



**Уральский  
федеральный  
университет**

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

**Институт радиоэлектроники  
и информационных  
технологий — РТФ**

**М. П. ТРУХИН**

# ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Практикум



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

М. П. Трухин

**ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВ**

Практикум

Рекомендовано методическим советом  
Уральского федерального университета  
для студентов вуза, обучающихся  
по направлению подготовки  
11.13.01 — Радиотехника,  
10.01.01 — Информационная безопасность

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2018

УДК 004.94:621.38/.39(075.8)

ББК 32.97я73+32в6я73

Т80

Рецензенты:

кафедра общепрофессиональных дисциплин технических специальностей,  
Уральский технический институт связи и информатики ФГБОУ «Сибир-  
ский государственный университет телекоммуникаций и информатики»  
(завкафедрой проф., д-р техн. наук Б. А. Панченко);  
проф., д-р техн. наук В. П. Часовских (Уральский государственный лесо-  
технический университет)

Научный редактор проф., д-р техн. наук В. Э. Иванов

**Трухин, М. П.**

Т80 Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэ-  
лектронных средств : практикум / М. П. Трухин. — Екатеринбург : Изд-во  
Урал. ун-та, 2018. — 176 с.

ISBN 978-5-7996-2290-9

Практикум содержит материалы по организации самостоятельной работы сту-  
дентов по моделированию электронных схем с помощью пакета прикладных про-  
грамм АНАЛИЗ. Описание интерфейса новой версии этого пакета, реализованно-  
го в среде системы моделирования MATLAB, сопровождается примерами анализа  
конкретных схем. Приведены указания по использованию пакета схемотехниче-  
ского моделирования Micro-Cap для сравнения и проверки полученных числен-  
ных результатов. Работа содержит также набор принципиальных схем для анали-  
за, требования к составлению отчетов и контрольные вопросы.

Практикум предназначен для бакалавров и специалистов направления «Радио-  
техника», а также для студентов и аспирантов, изучающих вопросы компьютерно-  
го моделирования и разработки электронных средств.

Библиогр.: 5 назв. Рис. 44. Табл. 2. Прил. 2.

УДК 004.94:621.38/.39(075.8)

ББК 32.97я73+32в6я73

ISBN 978-5-7996-2290-9

© Уральский федеральный  
университет, 2018



## Введение

---

Целью практикума является закрепление знаний студентов в области схемотехнического проектирования: самостоятельное освоение методов формирования и решения математических моделей электронных схем, а также приобретение практических навыков применения этих знаний к разработке и анализу конкретных схем.

Автоматизация проектирования радиоэлектронных схем означает прежде всего определение с помощью ЭВМ наиболее важных — системных — характеристик схемы и ознакомление с численными методами их нахождения. При анализе статического режима такой системной характеристикой является вектор аргументов нелинейностей, знание которого позволяет вычислить другие электрические параметры схемы [1]. Сам вектор нелинейностей вычисляется итерационным способом при решении системы нелинейных уравнений. Динамика состояния электронной схемы характеризуется в основном изменением запасов электрической энергии конденсаторов и магнитной энергии катушек индуктивности. Математическая модель электронной схемы в этом случае есть система дифференциальных уравнений, которая решается неявными методами численного интегрирования. Вычисляемый при этом вектор переменных состояния есть системная характеристика схемы в динамическом режиме, по нему находится искомый выходной вектор. Поэтому при выполнении самостоятельных работ в курсе «Основы компьютерного проектирования и моделирования РЭС» используется метод переменных состояния, позволяющий

с системных позиций подходить к анализу конкретных схем. Дополнительное ознакомление с широко известным пакетом MicroCAP [2] дает студенту возможность сравнить результаты анализа, сопоставить достоинства и недостатки метода переменных состояния и модифицированного метода узловых напряжений, реализованного в MicroCAP, при формировании математической модели схемы.

Практикум выполняется в виде ряда последовательных этапов, первый из которых является обязательным. Он описан в первом разделе, основная задача которого состоит в ознакомлении студентов с основными требованиями при выполнении самостоятельной работы. Последовательно — от получения индивидуального задания до списочной модели электронной схемы в трех режимах работы — подробно на примерах описывается начальный этап выполнения работ — этап преобразования и описания электронной схемы. Он включает в себя семь обязательных пунктов самостоятельной работы, проводимых без использования программ схемотехнического моделирования:

1. Расстановка номеров узлов на принципиальной схеме.
2. Установка на схеме дополнительных элементов.
3. Замена активных компонентов схемами замещения.
4. Составление эквивалентных схем для трех режимов работы схемы.
5. Формирование списочной модели схемы.
6. Формирование состава векторов и матриц математической модели.
7. Составление топологической и параметрической информации.

Второй этап самостоятельной работы, также обязательный для выполнения всех заданий, описан во втором и третьем разделах практикума. Они содержат описание программных инструментов [1, 4], с помощью которых указанные выше пункты первого этапа выполняются на компьютере. Первый программный инструмент — программа СХЕМА — предназначен для компьютерной разработки эквивалентных схем и их матрично-топологического описания, второй — программа СИСТЕМА — для формирования математических моделей электронных схем в трех режимах работы.

Третий этап — это индивидуальное выполнение конкретного задания по анализу и сравнительному исследованию временных и частотных характеристик электронной схемы. Практикум содержит семь возможных вариантов самостоятельных исследований, описание проведения которых приведено в отдельных разделах (с четвертого по десятый):

- анализ схем в статическом режиме (программа СТАТИКА);
- анализ схем в динамическом режиме (программа ДИНАМИКА);
- анализ дискретных моделей схем (программа ДИСКРЕТ);
- анализ схем в линейаризованном режиме (программа ФУНКЦИЯ);
- анализ чувствительности схемы в статическом режиме (программа ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ);
- анализ чувствительности схемных функций линейных схем (программа БИФУНКЦИЯ);
- статистический анализ схем (программа СТАТИСТИКА).

Все названные программы составлены таким образом, чтобы познакомить студента с конкретным вычислительным алгоритмом. Например, в программе СХЕМА показано использование элементарных матричных операций для диагонализации прямоугольных топологических матриц и эквивалентное выделение дерева графа схемы. Связанная с ней программа СИСТЕМА с помощью типовых матричных преобразований формирует в виде матриц математические модели в трех режимах работы схемы: статическом, динамическом и линейаризованном. Результаты работы программ СХЕМА и СИСТЕМА являются исходными для всех других программ пакета АНАЛИЗ.

Программа СТАТИКА знакомит с итерационными методами решения нелинейных алгебраических уравнений (метод простой итерации и метод Ньютона—Рафсона и др.). В программе ДИНАМИКА применяются методы численного интегрирования систем нелинейных алгебродифференциальных уравнений (явные и неявные методы Эйлера, Рунге—Кутты, линейные многшаговые методы). Неявные варианты этих методов используются в программе ДИСКРЕТ также для анализа временных характеристик электронных схем.

В программах ФУНКЦИЯ и БИФУНКЦИЯ применяется рекуррентный метод Фаддеева—Леверье (вычисление коэффициентов полиномов), на котором базируется алгоритм определения коэффициентов схемных функций и функций чувствительности по временной модели схемы. В программе ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ методом малых приращений параметров радиоэлементов вычисляются абсолютные и относительные коэффициенты чувствительности электронной схемы по постоянному току. Программа СТАТИСТИКА реализует метод статистического моделирования (Монте-Карло) для определения вероятностных характеристик выходных параметров электронной схемы.

Сопоставление результатов анализа схем с помощью названных программ с результатами моделирования этих же схем с помощью других программных инструментов (Micro-CAP, MultiSim, DesignLab, OrCAD и др.) позволяет убедиться в правильности и точности выполненных исследований. Эти популярные коммерческие программы моделирования электронных схем имеют почти одинаковую вычислительную «оснастку» и по существу различаются интерфейсом: средствами ввода информации об электронной схеме и вывода полученных результатов. Овладение этим интерфейсом есть необходимое условие использования любой современной компьютерной программы моделирования.

Однако грамотное проведение анализа схемы невозможно без понимания того, как программа формирует математическую модель и решает ее при заданных требованиях к точности и достоверности. Поэтому последовательное и обдуманное выполнение всех трех этапов практикума даст возможность студенту освоить типовые методы и алгоритмы схемотехнического проектирования электронных схем.

При подготовке практикума большая помощь была оказана старшим преподавателем Мясниковым Ф. С., за что автор выражает ему искреннюю признательность.

# 1. Получение задания и подготовка электронной схемы для анализа

---

**В** первом разделе практикума по учебной дисциплине «Основы компьютерного проектирования и моделирования РЭС» описывается порядок получения студентами электронной схемы для анализа, ее корректировка в соответствии с целями исследования, а также представление информации о схеме согласно нормативным требованиям соответствующих стандартов. Выполнение указаний этого раздела для всех индивидуальных заданий обязательно.

## 1.1. Виды заданий для самостоятельной работы

---

В качестве конкретного задания для выполнения самостоятельной работы студент по указанию преподавателя получает электронную схему и список видов ее анализа. Набор принципиальных электрических схем представлен в прил. 1, и студенту сообщается номер рисунка с изображением заданной электронной схемы. Состав видов анализа зависит от рабочей программы учебной дисциплины и, как правило, одинаков для всей студенческой группы. Видами заданий для самостоятельной работы со схемой могут быть:

1. Расстановка номеров узлов на принципиальной схеме.
2. Установка на схеме дополнительных элементов: источников питания, источников входных сигналов и т. п.

3. Замена активных компонентов (транзисторов, диодов и т. п.) схемами замещения.
4. Составление вручную эквивалентных схем для трех режимов: статического, динамического и малых сигналов.
5. Формирование списочной модели схемы.
6. Формирование состава векторов и матриц математической модели схемы для каждого режима.
7. Ручное составление топологической и параметрической информации об электронной схеме.
8. Машинное формирование (с помощью программы СХЕМА) топологической и параметрической информации об электронной схеме.
9. Машинное формирование (с помощью программы СИСТЕМА) математических моделей электронной схемы во всех трех режимах.
10. Компьютерный анализ с помощью программы СТАТИКА электронной схемы в статическом режиме.
11. Компьютерный анализ с помощью программы ДИНАМИКА электронной схемы в динамическом режиме.
12. Компьютерный анализ с помощью программы ДИСКРЕТ дискретной модели электронной схемы в динамическом режиме.
13. Компьютерный анализ с помощью программы ФУНКЦИЯ линейной модели электронной схемы в частотной области.
14. Компьютерный анализ шумовых свойств электронной схемы.
15. Анализ чувствительности электронной схемы в статическом режиме с помощью самостоятельно подготовленной процедуры вычислений.
16. Компьютерный анализ чувствительности схемных функций с помощью программы БИФУНКЦИЯ линейной модели электронной схемы.
17. Компьютерный анализ чувствительности электронной схемы в статическом режиме с помощью программы ВАРИАЦИЯ.
18. Статистический анализ электронной схемы в статическом режиме с помощью программы СТАТИСТИКА.
19. Параметрическая оптимизация электронной схемы в статическом режиме с помощью самостоятельно подготовленной процедуры вычислений.

20. Сравнение результатов анализа, полученных разными программами схемотехнического моделирования (программы пакета АНАЛИЗ и программа Micro-Cap, программа моделирования MATLAB и программа Micro-Cap).

**Пример 1.1.** Получение электронной схемы и расстановка номеров узлов на принципиальной схеме (задание 1)

Предположим, задана электронная схема, изображенная на рис. 1.1. Сначала выбирается узел с максимальным числом подходящих к нему элементов схемы и обозначается как заземленный или нулевой. Далее в направлении слева-направо и сверху-вниз поочередно нумеруются все узлы схемы. При этом узлом считается проводник с одинаковым узловым потенциалом для всех элементов, подключенных к этому узлу, как, например, узел 3 (длинный проводник — «минус» источника питания).

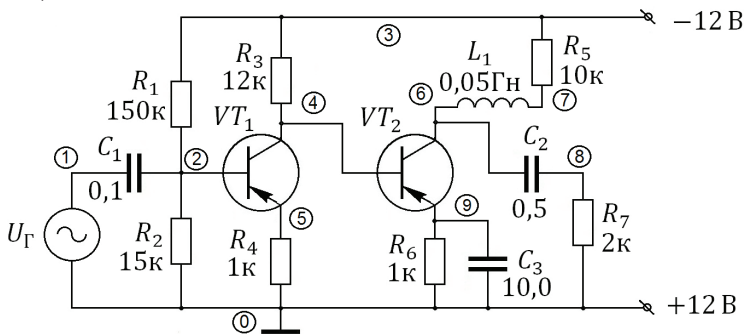


Рис. 1.1. Заданная схема и проведение расстановки номеров узлов

В заданной схеме оказалось 10 узлов, включая нулевой, и 15 элементов. Хотя на схеме источник питания  $E_2$  не обозначен, он должен учитываться при определении так называемых габаритных параметров электронной схемы:  $Y = 10$ ,  $V = 15$ .

## 1.2. Преобразование и описание электронной схемы

Полученная от преподавателя принципиальная электрическая схема для проведения последующего анализа должна быть скорректирована с учетом вида (или видов) самостоятельной работы.

### 1.2.1. Расстановка номеров узлов на принципиальной схеме

В схему необходимо вставить (если они отсутствуют) источники питания в виде независимых источников ЭДС, как, например, в схеме на рис. 1.2.

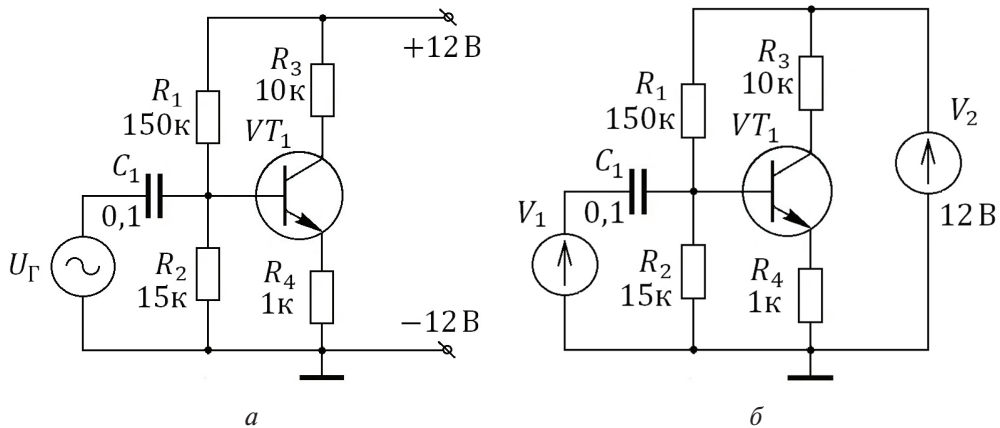


Рис. 1.2. Заданная схема (а) и схема с установленным источником питания (б)

Тем самым в дополненной схеме создаются замкнутые пути для постоянного тока: ток протекает без разрывов по соответствующим элементам схемы. В этой операции не создаются новые узлы. Кроме того, в схеме должен быть один заземленный (нулевой) узел, т.е. один проводник должен соединять все заземленные узлы.

### 1.2.2. Установка на схеме дополнительных элементов

Если в схеме отсутствует источник входных сигналов (см. рис. 1.3, а), то последующий анализ схемы в заданном динамическом режиме и/или режиме малого сигнала невозможен. Поэтому схема дополняется источником входного сигнала. Таким элементом обычно является независимый источник переменного напряжения, конкретная зависимость от времени которого будет определена при проведении заданного анализа. Такой элемент подключается через разделительный конденсатор  $C1$ , как это показано на схеме (см. рис. 1.3, б).



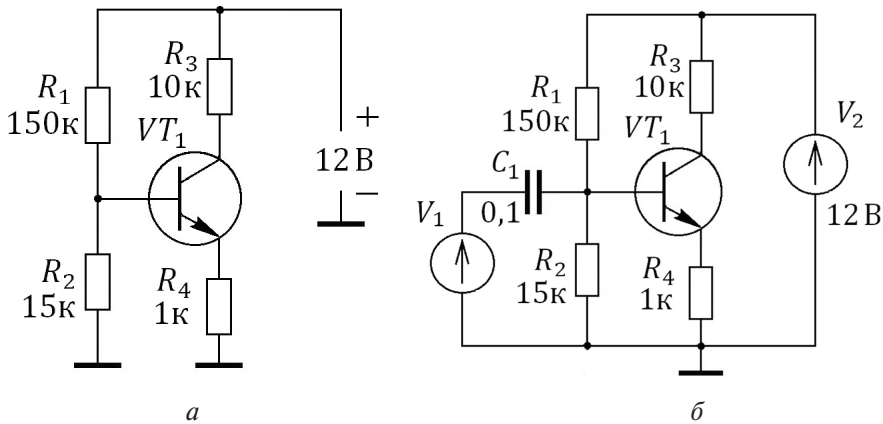


Рис. 1.3. Заданная схема (а) и схема с установленным источником входного сигнала (б)

Если в схеме, на взгляд студента, должны быть проведены другие изменения, то они могут быть выполнены по согласованию с преподавателем. Например, заданная схема представляет собой фрагмент реальной принципиальной схемы, в которой имеется большое число разнотипных компонентов. Тогда возможно упрощение фрагмента за счет исключения некоторых компонентов, не нужных или слабо влияющих на результаты последующего анализа, как это показано на рис. 1.4. Однако следует иметь в виду, что в упрощенном варианте должно быть не менее двух биполярных транзисторов и одного-двух диодов.

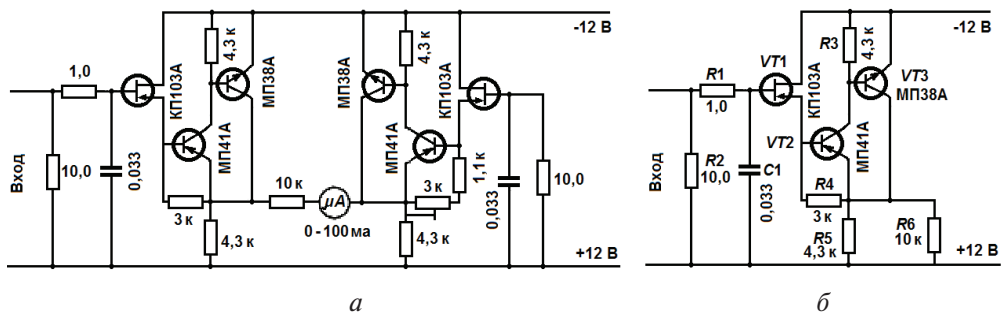


Рис. 1.4. Заданная схема (а) и упрощенная схема с исключенными элементами (б)

После всех преобразований схема приобретает окончательный вид и должна быть представлена согласно требованиям ЕСКД (ГОСТ 12345–66) как принципиальная электрическая схема. Ее изо-

бражение обязательно согласовывается с преподавателем, копируется и сохраняется в файле отчета о самостоятельной работе как **исходная схема** для выполнения всех последующих заданий.

### 1.2.3. Замена активных компонентов схемами замещения

Задание по замене активных компонентов (транзисторов, диодов и т. п.) схемами замещения выполняется следующим образом.

Сначала определяется режим работы исходной схемы. Их три: по постоянному току (статический), меняющихся напряжений и токов в зависимости от времени (динамический) и режим малых сигналов и/или шумов (линейный). В прил. 2 приведены универсальные модели полупроводниковых приборов. В зависимости от выбранного режима по ним формируются соответствующие схемы замещения [1, 3]. Далее в исходной схеме они подставляются вместо замещаемых компонентов и на теперь уже эквивалентной схеме указываются позиционные обозначения и параметры для вновь появившихся элементов (рис. 1.5). Выбор схем замещения существенно влияет на результаты анализа РЭС, поэтому следует выполнить ее весьма ответственно.

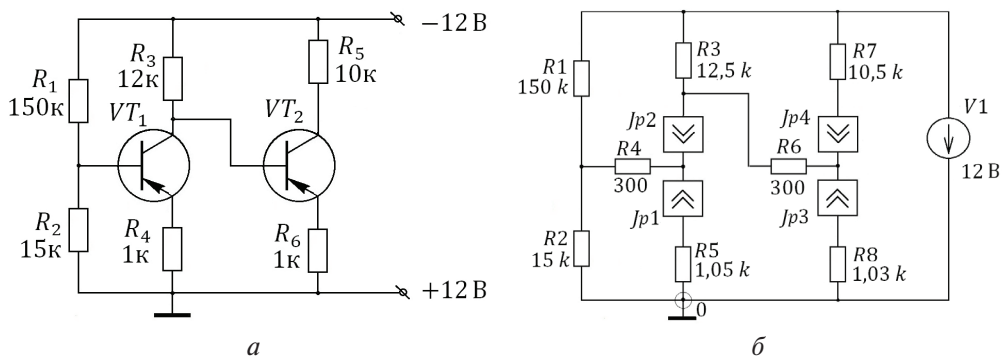


Рис. 1.5. Замещение в исходной схеме (а) биполярных транзисторов и получение эквивалентной схемы по постоянному току (б)

### 1.2.4. Составление эквивалентных схем для трех режимов работы схемы

Составление вручную эквивалентных схем для трех режимов — статического, динамического и малых сигналов — выполняется в указанной ниже последовательности с использованием законов теории электрических цепей [5].

Сначала по исходной схеме составляется эквивалентная схема по постоянному току. Порядок ее разработки следующий:

- на исходной схеме вставляются (при их отсутствии) идеальные источники напряжения и тока, как это делается в первом задании (см. рис. 1.1 и рис. 1.5, а);
- в дополненной источниками питания исходной схеме исключаются все реактивности: емкости, соединяющие узлы схемы, просто удаляются, а катушки индуктивности заменяются проводниками;
- если параллельно одиночной катушке или катушкам трансформатора в исходной схеме были подключены другие компоненты или их комбинации, то они также удаляются;
- все активные компоненты схемы — транзисторы, диоды, операционные усилители, оптопары и т. п. — заменяются схемами замещения по постоянному току. Некоторые элементы схем замещения могут объединяться (особенно при последовательном соединении сопротивлений) с элементами исходной схемы, как это показано на рис. 1.5, б;
- нумеруются узлы полученной эквивалентной схемы, включая нулевой, устанавливаются позиционные обозначения и параметры ее элементов. Параметры сопротивлений следует указывать в килоомах, напряжения — в вольтах, токи — в миллиамперах. Эквивалентная схема примет вид, изображенный на рис. 1.6. В ней имеется 13 элементов и 9 узлов, включая базовый.

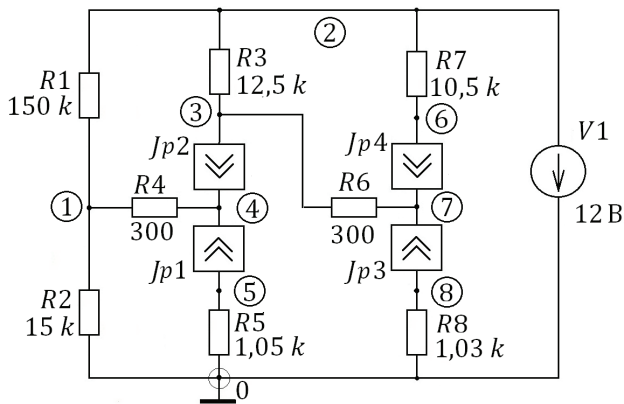


Рис. 1.6. Эквивалентная схема двухкаскадного усилителя по постоянному току

Далее по исходной схеме составляется эквивалентная схема в динамическом режиме. Порядок ее разработки отличается от приведенного выше отсутствием второго и третьего пунктов. Очевидно, что схемы замещения должны моделировать динамические процессы в схеме и соответствовать уровням напряжений и токов и частотному диапазону, которые, в свою очередь, определяются назначением исходной схемы. Например, на высоких частотах (свыше 3 МГц) обязательно включение в состав схем замещения полупроводниковых диодов и транзисторов емкостей  $p$ - $n$ -переходов. Образец эквивалентной схемы двухкаскадного усилителя в динамическом режиме представлен на рис. 1.7. В схеме имеется 19 элементов и 12 узлов, включая базовый.

Наконец, составляется эквивалентная схема в линейном режиме (режиме малых сигналов). По сравнению с разработкой эквивалентной схемы в динамическом режиме здесь, во-первых, используются совершенно другие схемы замещения активных компонентов, во-вторых, обязательно исключаются источники питания: источники напряжения исходной схемы замыкаются — вместо них вставляются проводники, а источники постоянного тока из схемы удаляются совсем. Поэтому на эквивалентной схеме двухкаскадного усилителя в линейном режиме (рис. 1.8) имеется 19 элементов и 9 узлов вместе с базовым.

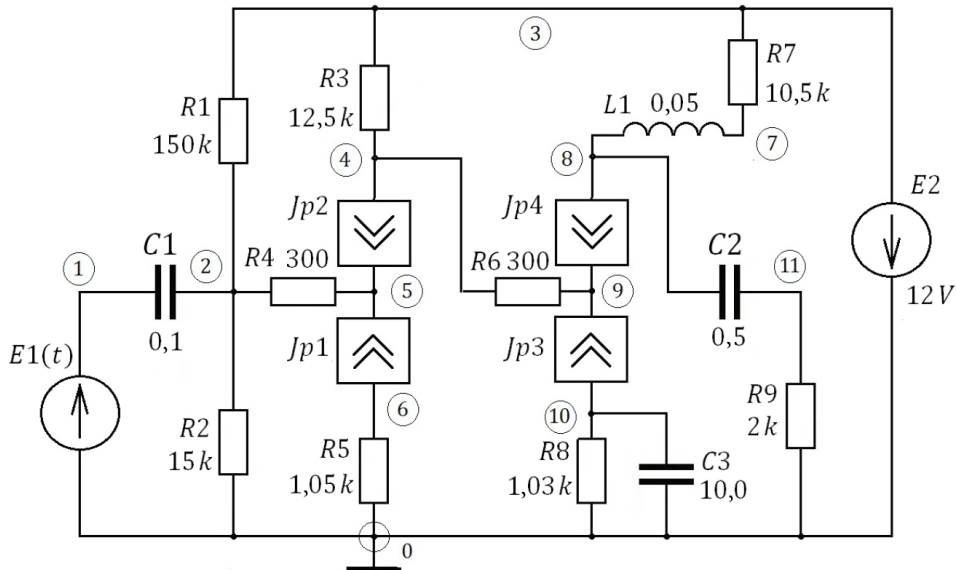


Рис. 1.7. Эквивалентная схема двухкаскадного усилителя в динамическом режиме

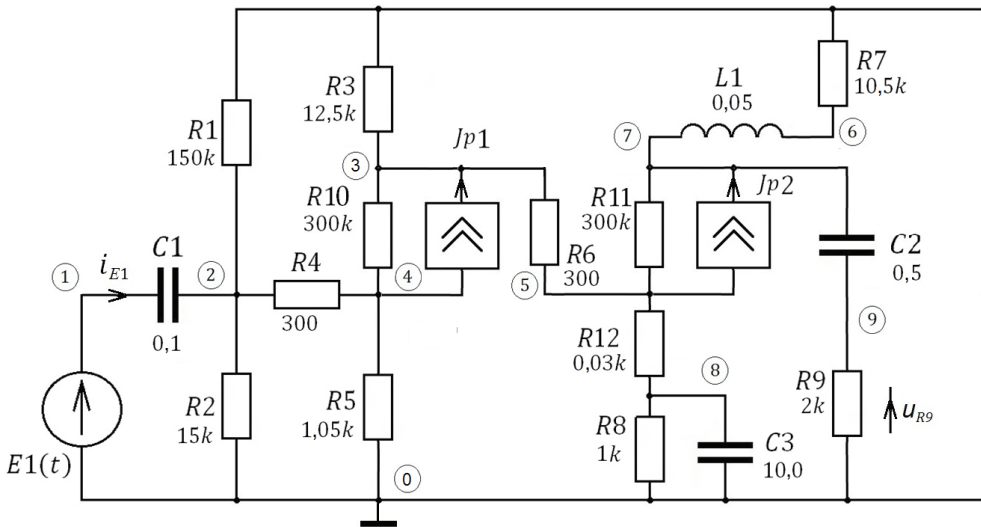


Рис. 1.8. Эквивалентная схема двухкаскадного усилителя в линейном режиме

### 1.2.5. Формирование списочной модели схемы

Формирование списочной модели схемы заключается в составлении текстового файла, содержащего топологическую и параметрическую информацию о соответствующей схеме.

Составление списочной модели по заданной принципиальной схеме начинается с нумерации узлов. Она выполняется сквозной от 0 до  $(Y-1)$ , где  $Y$  — полное число узлов схемы. Базовый узел следует обозначить нулем. Каждому компоненту схемы соответствует одна строка списка. Для каждого двухполюсника в строке должно быть четыре объекта:

Обозначение элемента	Нач. узел	Кон. узел	Параметр (модель)
<b>E1</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>12.0</b>

и пять для каждого трехполюсника (биполярный транзистор):

Обозначение элемента	Коллектор	База	Эмиттер	Имя модели
<b>Q1</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>КТ315</b>

Для обозначения типовых моделей Эберса—Молла замещения биполярных транзисторов следует применять обозначения: **Qnom** — для *npr*-транзисторов, **Qpom** — для *pnp*-транзисторов. Параметры элементов представляются в радиотехническом масштабе: вольт, миллиампер, килоом, микрофарада, генри, миллисекунда.

Зависимые источники токов, моделирующие  $p$ - $n$ -переходы транзисторов в эквивалентных схемах, следует обозначать таким образом:

**Jp<n>e** — эмиттерный переход, где  $n$  — порядковый номер транзистора;

**Jp<n>k** — его коллекторный переход;

**Rb<n>** — базовое сопротивление транзистора;

**Cc<n>** — емкость перехода коллектор-база транзистора;

**Rc<n>** — сопротивление перехода коллектор-база транзистора;

**Re<n>** — сопротивление перехода эмиттер-база транзистора.

Зависимые источники токов, моделирующие  $p$ - $n$ -переходы полупроводниковых диодов в эквивалентных схемах, обозначаются так же:

**Jpd<n>** — полупроводниковый диод с номером  $n$ ;

**Rod<n>** — его прямое сопротивление;

**Ryd<n>** — его сопротивление утечки;

**Cd<n>** — емкость перехода диода.

### Пример 1.2. Составление списочных моделей

На рис. 1.9 приведены принципиальная схема двухкаскадного усилителя с гальванической связью между каскадами и его эквивалентная схема в динамическом режиме на низких частотах.

Составим сначала описание принципиальной схемы усилителя. Для этого сначала переобозначим компоненты на схеме: все сопротивления, емкости и индуктивности, диоды и транзисторы пронумеруем по порядку, причем у транзисторов поменяем позиционное обозначение на символ **Q**. Источник входных сигналов обозначим **E1**, источник питания **E2**. Далее пронумеруем все узлы в порядке возрастания, базовому узлу присвоим номер 0. Наконец, определим габаритные числа схемы: **B** — число компонентов схемы, **Y** — полное число узлов схемы. После этих манипуляций со схемой в любом текстовом редакторе составим ее списочную модель и запомним текст описания в файле с расширением **\*.lst**.

При формировании любой списочной модели следует придерживаться следующих рекомендаций:

- 1) символ **\*** в начале строки означает, что она является комментарием;
- 2) под позиционное обозначение компонента отводится 6 знаков, остальные символы строки разделяются произвольным числом пробелов;

- 3) все позиционные обозначения следует начинать с заглавной буквы;
- 4) все буквы в позиционных обозначениях должны быть латинскими;
- 5) разделитель целой и дробной частей нецелого числа должен быть точкой;
- 6) порядок описания компонентов (следования строк) — произвольный;
- 7) для обозначения промежутков между элементами строки следует применять только символ пробела (не использовать символы табуляции);
- 8) нужно проверить соответствие между габаритными числами схемы и ее описанием: число строк в списочной модели должно быть равно числу **В**, максимальный номер узла в описании — на единицу меньше числа **У**.

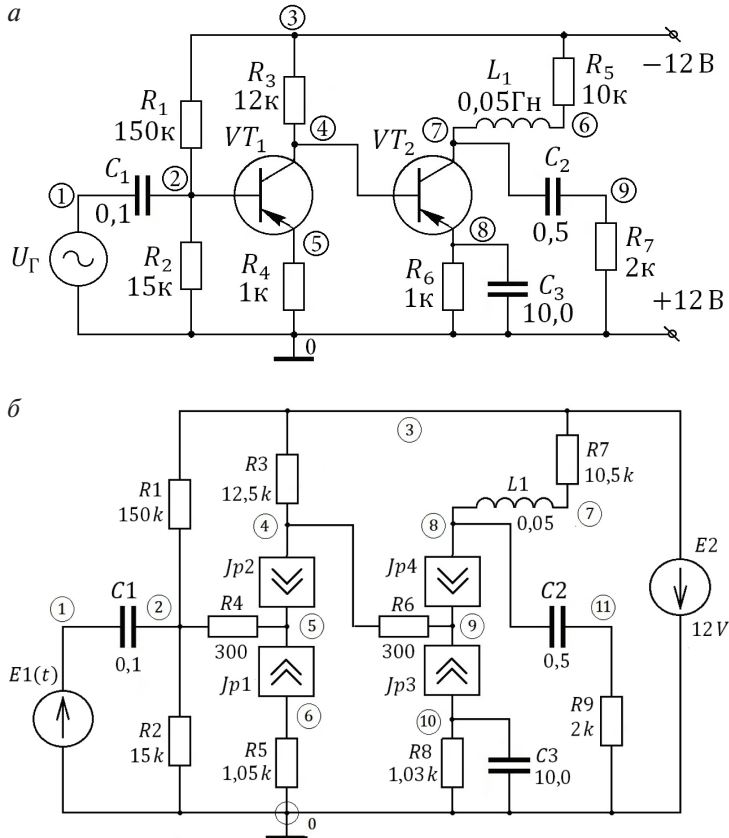


Рис. 1.9. Исходная принципиальная электрическая схема (а) и ее преобразованный вид (б)

В результате выполнения названных выше требований списочная модель исходной схемы примет вид:

**\*ГАБАРИТНЫЕ ЧИСЛА ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМЫ USILDN**

**\*В Y**

15 10

**\*СПИСОЧНАЯ МОДЕЛЬ СХЕМЫ**

E1	0	1	0	
C1	1	2	0.1	
R1	2	3	150	
R2	0	2	15	
Q1	4	2	5	Qром
R3	3	4	12	
R4	5	0	1	
R5	3	6	10	
L1	6	7	0.05	
Q2	7	4	8	Qром
R6	0	8	1	
C3	0	8	10	
R7	0	9	2	
E2	3	0	12	
C2	7	9	0.5	

Составление списочной модели эквивалентной схемы в любом из режимов работы схемы проводится аналогичным образом.

### 1.2.6. Формирование состава векторов и матриц математической модели

Формирование состава векторов и матриц математической модели схемы (ММС) для каждого режима начинается с анализа этой математической модели. Проведем такой анализ сначала для статического режима. Математическая модель в статическом режиме представляет собой систему нелинейных алгебраических уравнений, порядок которой определяется числом зависимых источников в эквивалентной схеме [1]

$$\mathbf{N} = \mathbf{E}_{nn} \mathbf{f}(\mathbf{N}) + \mathbf{N}_w, \quad (1.1)$$

где  $\mathbf{E}_{nn}$  — статическая матрица схемы, квадратная, порядка  $(b_i + b_j)$ ;  $\mathbf{N}_w$  — вектор влияния источников, число элементов которого также равно  $(b_i + b_j)$ . Здесь  $b_i$  — число зависимых источников напряжения,  $b_j$  — число зависимых источников тока. (Для упрощения записи здесь и далее все векторы представляются прямыми полужирными латинскими буквами, матрицы — прямыми простыми латинскими буквами.)



Сначала определяются габаритные числа источников, а затем состав вектора  $\mathbf{S}$  и  $\mathbf{N}$  и матрицы  $E_{nn}$ . Каждый полупроводниковый диод исходной схемы на эквивалентной схеме представляется одним зависимым источником тока, каждый биполярный транзистор — двумя зависимыми источниками тока, управляемыми напряжением, каждый полевой транзистор — одним таким источником. Если принципиальная схема содержит из активных компонентов только  $K_T$  биполярных транзисторов и  $K_d$  полупроводниковых диодов, то общее число зависимых источников тока на эквивалентной схеме равно  $bj = 2K_T + K_d$ , зависимых источников напряжения не будет. Вектор источников тока  $\mathbf{S}$  формируется следующим образом: сначала в порядке нумерации записываются зависимые источники тока, представляющие диоды, затем также в порядке нумерации — зависимые источники тока, представляющие транзисторы (см. п. 1.2.5):

$$\mathbf{S} = [Jpd1, Jpd2, \dots, Jpd < K_d >, Jp1e, Jp1k, Jp2e, Jp2k, \dots]^T.$$

Так как эти источники тока управляются падениями напряжений на них самих, то состав вектора аргументов нелинейностей  $\mathbf{N}$  будет подобным:

$$\mathbf{N} = [Upd1, Upd2, \dots, Upd < K_d >, Up1e, Up1k, Up2e, Up2k, \dots]^T.$$

Порядок статической матрицы (она квадратная) равен числу элементов векторов  $\mathbf{S}$  и  $\mathbf{N}$ . Ее элементы образуют четыре подматрицы

$$E_{nn} = \frac{K_d}{K_T} \left[ \begin{array}{c|c} K_d & K_T \\ \hline E_{dd} & E_{dq} \\ \hline E_{qd} & E_{qq} \end{array} \right],$$

каждая из которых связывает токи источников соответствующих групп с падениями напряжений на этих же группах источников. Электрически статическая матрица по размерности соответствует сопротивлению (кОм) или, в общем случае, сопротивлению и проводимости (кОм и мСм) и моделирует влияние резисторов на распределение потенциалов и токов в схеме.

Математическая модель в динамическом режиме — система нелинейных алгебродифференциальных уравнений, порядок которой

по дифференциальной части определяется числом независимых запасов электрической ( $bc$ ) и магнитной ( $bl$ ) энергии в схеме (в большинстве случаев общим числом емкостей  $K_c = bc$  и индуктивностей  $K_l = bl$  электронной схемы). Алгебраическая система нелинейных уравнений имеет порядок, равный числу зависимых источников в эквивалентной схеме ( $bu + bj$ ).

Основой формирования ММС в динамическом режиме являются пять векторно-матричных уравнений метода переменных состояния [1]:

$$d\mathbf{V}(t)/dt = \mathbf{H}\mathbf{V}(t) + \mathbf{D}\mathbf{W}(t) + \mathbf{E}\mathbf{S}(t) + \mathbf{F}\mathbf{P}(t) \quad (1.2)$$

— уравнение состояния;

$$\mathbf{S}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{N}(t)) \quad (1.3)$$

— уравнение нелинейностей;

$$\mathbf{N}(t) = \mathbf{H}_n\mathbf{V}(t) + \mathbf{D}_n\mathbf{W}(t) + \mathbf{E}_n\mathbf{S}(t) + \mathbf{F}_n\mathbf{P}(t) \quad (1.4)$$

— уравнение аргументов нелинейностей;

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{H}_p\mathbf{V}(t) + \mathbf{D}_p\mathbf{W}(t) + \mathbf{E}_p\mathbf{S}(t) \quad (1.5)$$

— уравнение резистивных переменных;

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{H}_y\mathbf{V}(t) + \mathbf{D}_y\mathbf{W}(t) + \mathbf{E}_y\mathbf{S}(t) + \mathbf{F}_y\mathbf{P}(t) \quad (1.6)$$

— уравнение наблюдения.

Поскольку векторы  $\mathbf{V}(t)$ ,  $\mathbf{W}(t)$ ,  $\mathbf{S}(t)$  и  $\mathbf{P}(t)$ , образующие весовое суммирование в уравнении состояния, входят в остальные уравнения математической модели схемы, то они единственным образом определяют динамику поведения схемы. Они состоят из падений напряжений и токов на различных типах элементов эквивалентной схемы:

— вектор состояния

$$\mathbf{V}(t) = [u_{C_1}(t), u_{C_2}(t), \dots, u_{C_{bc}}(t); i_{L_1}(t), i_{L_2}(t), \dots, i_{L_{bl}}(t)]^T;$$

— вектор управления

$$\mathbf{W}(t) = [u_{V_1}(t), u_{V_2}(t), \dots, u_{V_{bc}}(t); i_{I_1}(t), i_{I_2}(t), \dots, i_{I_{bl}}(t)]^T;$$

— вектор нелинейностей

$$\mathbf{S}(t) = \left[ u_{3_1}(t), u_{3_2}(t), \dots, u_{3_{bu}}(t); i_{\pi_1}(t), i_{\pi_2}(t), \dots, i_{\pi_{bf}}(t) \right]^T;$$

— вектор резистивностей

$$\mathbf{P}(t) = \left[ u_{R_1}(t), u_{R_2}(t), \dots, u_{R_{br}}(t); i_{G_1}(t), i_{G_2}(t), \dots, i_{G_{bg}}(t) \right]^T.$$

**Пример 1.3.** Определение состава векторов ММС в динамическом режиме

На рис. 1.7 приведена эквивалентная схема двухкаскадного усилителя в динамическом режиме. Запишем состав векторов ее ММС (надстрочная буква Т означает транспонирование):

— вектор состояния  $\mathbf{V}(t) = \left[ u_{C_1}(t), u_{C_2}(t), u_{C_3}(t); i_{L_1}(t) \right]^T;$

— вектор управления  $\mathbf{W}(t) = \left[ u_{E_1}(t), u_{E_2}(t) \right]^T;$

— вектор нелинейностей  $\mathbf{S}(t) = \left[ i_{Jp1e}(t), i_{Jp1k}(t), i_{Jp2e}(t), i_{Jp2k}(t) \right]^T;$

— вектор резистивностей

$$\mathbf{P}(t) = \left[ u_{R_1}(t), u_{R_2}(t), u_{R_3}(t), u_{R_4}(t), u_{R_5}(t), u_{R_6}(t), u_{R_7}(t), u_{R_8}(t), u_{R_9}(t) \right]^T.$$

Математическая модель в линейном режиме — система линейных дифференциальных уравнений, порядок  $bv$  которой определяется числом независимых запасов электрической и магнитной энергии в схеме (в большинстве случаев общим числом  $(bv = bc + bl)$  емкостей и индуктивностей схемы):

— уравнение состояния

$$d\mathbf{V}(t)/dt = \mathbf{H}_л \mathbf{V}(t) + \mathbf{D}_л \mathbf{W}(t), \quad (1.7)$$

— уравнение наблюдения

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{H}_{yl} \mathbf{V}(t) + \mathbf{D}_{yl} \mathbf{W}(t). \quad (1.8)$$

Состав двух векторов  $\mathbf{V}(t)$  и  $\mathbf{W}(t)$  уже рассматривался при анализе динамического режима, состав вектора наблюдения  $\mathbf{Y}(t)$  зависит от выбранных разработчиком схемы интересующих его электрических параметров. Например, для показанных стрелками на эквивалентной

схеме (см. рис. 1.8) наблюдаемых падений  $p$  напряжений  $u_{E1}$  и  $u_{R9}$  этот вектор запишется в виде

$$\mathbf{Y}(t) = [u_{E1}(t) \ u_{R9}(t)]^T.$$

### 1.2.7. Составление топологической и параметрической информации

Ручное составление топологической и параметрической информации об электронной схеме заключается в составлении графа эквивалентной схемы, выделении в нем дерева и записи по этим топологическим образам схемы матрицы инцидентий и векторов, содержащих числовые данные о параметрах схемы. Покажем этот процесс на примере эквивалентной схемы в статическом режиме.

**Пример 1.4.** Составление топологической и параметрической информации об электронной схеме в статическом режиме

На рис. 1.10, *а* приведена эквивалентная схема двухкаскадного усилителя в статическом режиме, на рис. 1.10, *б* — граф этой схемы с выделенным деревом. Выделение дерева проходит по приоритету ветвей:

источники напряжения  $\rightarrow$  емкости  $\rightarrow$  сопротивления.

В данном случае емкости отсутствуют, поэтому в дерево входят почти все сопротивления (кроме  $R1$ ), в дополнение дерева — все зависимые источники тока.

По ориентированному графу эквивалентной схемы составляется матрица инцидентий (это топологическая информация)

$$A = \begin{array}{c|cccccccccccccc} & V1 & R1 & R2 & R3 & R4 & R5 & R6 & R7 & R8 & Jp1 & Jp2 & Jp3 & Jp4 \\ \hline 1 & 0 & -1 & +1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & -1 & +1 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & +1 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & +1 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{array}.$$

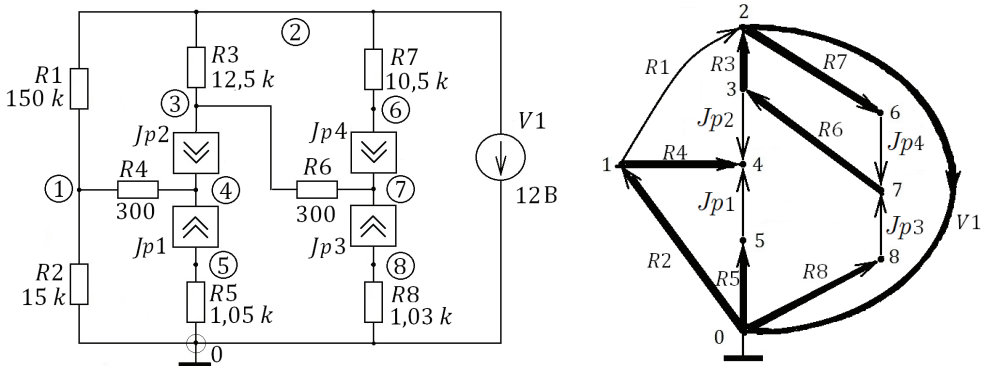


Рис. 1.10. Эквивалентная схема (а) и ее граф с выделенным деревом (б)

По эквивалентной схеме с учетом выделенного дерева графа записываются параметрические векторы:

- вектор зависимых источников напряжения  $\mathbf{U} = []$  (отсутствует);
- вектор независимых источников напряжения  $\mathbf{E} = [V1] = [12]$ ;
- вектор сопротивлений ребер  
 $\mathbf{R} = [R2\ R3\ R4\ R5\ R6\ R7\ R8] = [15\ 12,5\ 0,3\ 1,05\ 0,3\ 10,5\ 1,03]$ ;
- вектор проводимостей хорд  $\mathbf{G} = [1/R1] = [0,006667]$ ;
- вектор независимых источников тока  $\mathbf{I} = []$  (отсутствует);
- вектор зависимых источников тока  $\mathbf{J} = [Jp1\ Jp2\ Jp3\ Jp4]$ .

### 1.3. Информация об исходной электронной схеме

1. Копия электронной схемы, выданная преподавателем с указанием назначения (краткое описание работы схемы) и источника (откуда взята).
2. Принципиальная электрическая схема (ПЭСх), перерисованная по нормам ЕСКД (с указанием номеров узлов).
3. Текстовый файл со списочной моделью ПЭСх, подготовленный согласно указаниям п. 1.2.5.
4. Полные описания процесса выполнения индивидуальных заданий в порядке их перечисления в параграфе 1.1. Если некоторые из них отсутствуют, то номер соответствующего пункта в отчете пропускается.

## Контрольные вопросы и задания

---

1. Дайте определение электронной схемы, принципиальной электрической схемы и эквивалентной схемы.
2. Каким образом определить порядок электронной схемы?
3. В чем состоит различие и сходство описания параметрической и топологической информации об электронной схеме?
4. Влияет ли обозначение узлов схемы на формирование ее модели?
5. Что такое система главных контуров и система главных сечений?
6. Назовите элементарные матричные преобразования. Каким образом они используются при переходе от матрицы  $A$  к ее представлению в виде  $[1, P_x]$ ?
7. Назовите основные непараметрические опции модуля PSpice.
8. Назовите основные параметрические опции модуля PSpice.
9. Поясните смысл символов, стоящих в начале строки файла описания схемы в модуле PSpice.
10. Перечислите соответствия символов латинского алфавита и типов радиокомпонентов в модуле PSpice.

## 2. Компьютерная разработка эквивалентных схем и их матрично-топологическое описание

---

### 2.1. Интерфейс программы СХЕМА

---

Начало компьютерного анализа соответствует восьмому варианту индивидуального задания (см. п. 1.1) и означает преобразование заданной принципиальной или эквивалентной схемы в стандартный набор матриц, векторов и других компьютерных объектов. Эту задачу выполняет учебная программа СХЕМА, разработанная в среде MATLAB [4] специально для формирования по небольшим принципиальным электрическим схемам (до 20 радиокомпонентов) эквивалентных схем для трех режимов работы и последующего составления топологической и параметрической информации. Программа имеет типовой интерфейс, который создается на экране монитора при исполнении файла ресурса **СХЕМА.fig**. При взаимодействии с этим интерфейсом парный файл **СХЕМА.m** обрабатывает реакции на действия пользователя. Этот файл текстовый и поддается редактированию, поэтому может быть расширен по процедурам обработки данных. Для использования программы СХЕМА студент должен установить на свой компьютер систему технического моделирования MATLAB версии не ниже 7. Например, версия 12 приобретена в УрФУ для коллективного пользования и широко применяется для проведения лабораторных работ.

В командном окне MATLAB по команде **СХЕМА** запускается файл ресурса **СХЕМА.fig** и на экране появляется окно с интерфейсом, представленным на рис. 2.1. Оно содержит пять панелей и одно окно для показа строковых данных. В верхней части интерфейса слева находится панель для организации ввода и вывода файлов, справа — панель для ввода параметров схем замещения биполярных транзисторов и полу-

проводниковых диодов. Внизу интерфейса расположены три панели: по отдельной панели для каждого режима работы схемы. В начале работы на панелях отсутствуют какие-либо объекты, по ходу выполнения задания они будут появляться и «заставлять» реагировать на них.

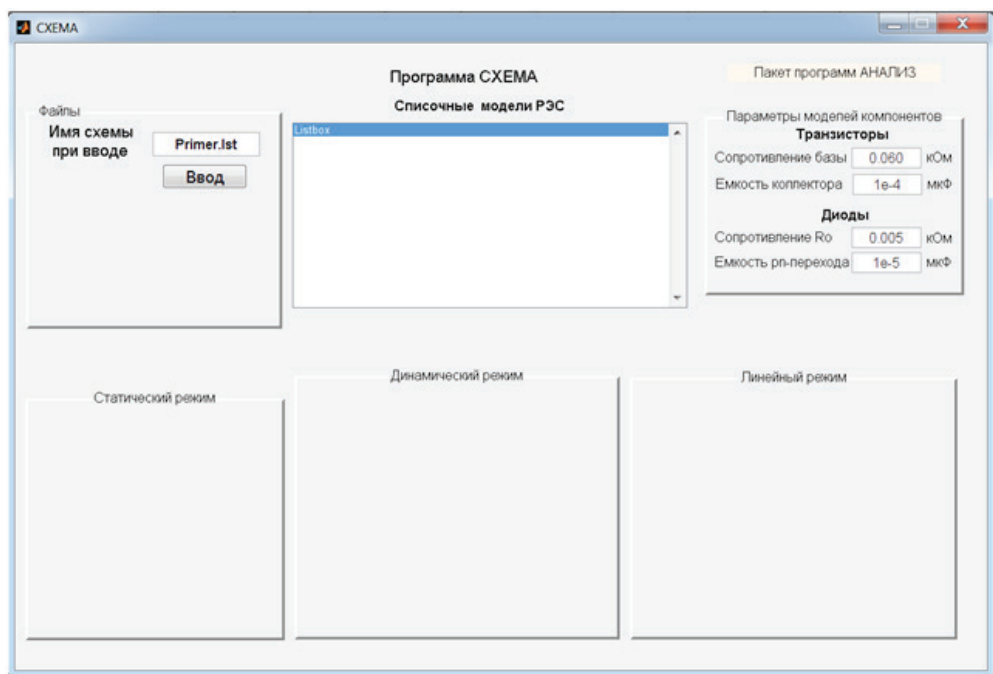


Рис. 2.1. Интерфейс программы CXEMA

Начало работы с программой CXEMA — ввод имени **1st**-файла со списочной моделью исходной ПЭСх вместо указанного в однострочном редакторе имени **Primer.1st**. Далее нажимается кнопка **Ввод** и на экране появляется стандартное окно поиска файлов для ввода данных (см. рис. 2.2).

После нажатия на кнопку **Ввод** в окне **Списочные модели РЭС** появляется набор строк из загружаемого файла. В программе имеется ряд проверок, поэтому возможны предупреждения об ошибках. Некоторые из них показаны на рис. 2.3. Конечно, эти ошибки должны быть устранены. Это можно сделать в исходном текстовом файле, однако небольшие ошибки (внутри строк) можно оперативно исправить в окне списка.



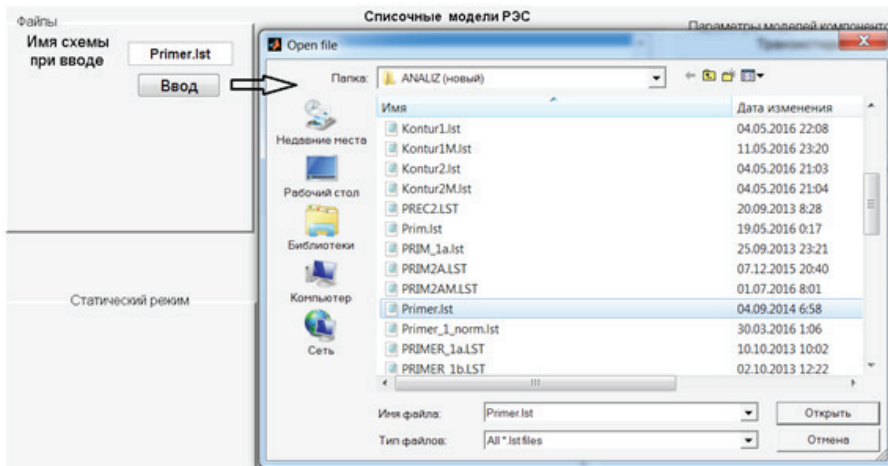


Рис. 2.2. Процесс поиска имени и ввода текстового файла со списком схемы

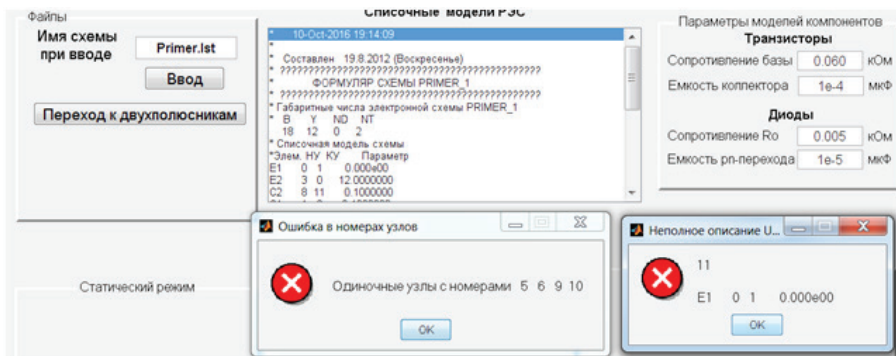


Рис. 2.3. Результат проверки правильности списочного описания ПЭСх

Для этого в списке находится ошибочная строка и выделяется мышкой так, чтобы она появилась в однострочном окне редактирования под главным окном со списком (см. рис. 2.4). Здесь она редактируется и по кнопке ОК заменяет неправильную строку в основном списке. Например, на рис. 2.4 старое обозначение зависимого источника тока (2012 г.) заменяется современным обозначением, рекомендованным в п. 1.2.5.

После устранения всех появившихся ошибок информация о схеме, содержащаяся в ее списочной модели, и дополнительная информация о параметрах моделей транзисторов и диодов на правой верхней панели однозначно определяют процедуру преобразования исходной схемы. При нажатии кнопки **Переход к двухполюсникам** происхо-

дит замена компонентов электронной схемы схемами замещения, состоящими только из двухполюсников. В результате выполнения этой процедуры в окне **Списочные модели РЭС** показывается развернутая или модифицированная списочная модель исходной схемы, которая по кнопке **Вывод** записывается в новый **1st**-файл с добавлением буквы М (рис. 2.5).

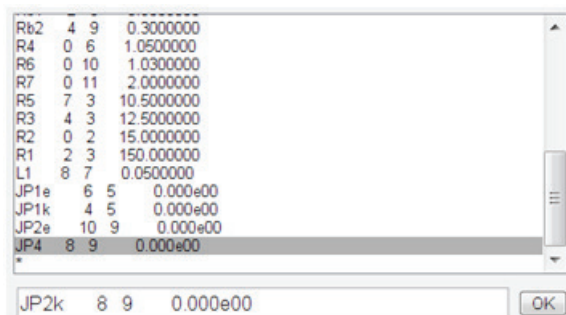


Рис. 2.4. Модификация неправильной строки в составе списочной модели с помощью однострочного текстового редактора

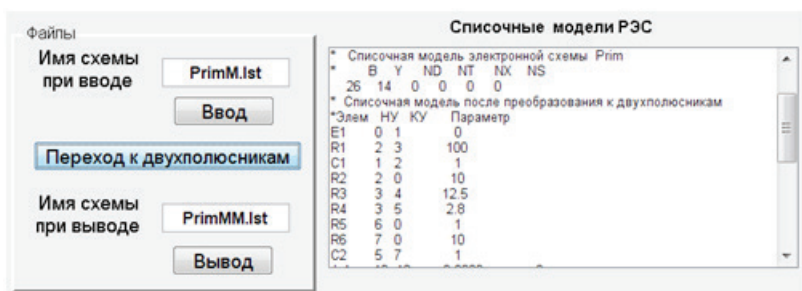


Рис. 2.5. Получение, показ и сохранение модифицированной списочной модели схемы

На нижних панелях появляются кнопки для исполнения процедур преобразования модифицированной модели схемы в эквивалентные схемы в соответствующих режимах (см. рис. 2.6).

Можно выбрать любой из трех режимов, можно выбрать последовательно все режимы при соответствующем выполнении указаний на панелях перед нажатием на кнопки **Показ списочной модели**. Например, списочная модель эквивалентной схемы в динамическом режиме выглядит так, как она показана на рис. 2.7. Она содержит топологическое описание схемы в виде матрицы  $P_x$ , параметрические

векторы хранят числовые значения всех двухполюсных элементов эквивалентной схемы.

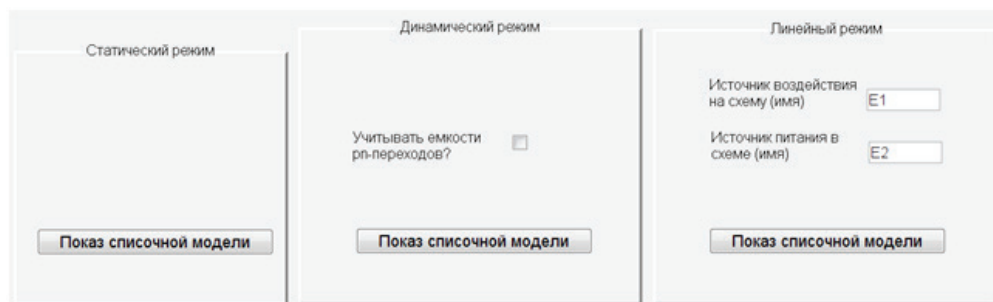


Рис. 2.6. Управление процедурами формирования эквивалентных схем

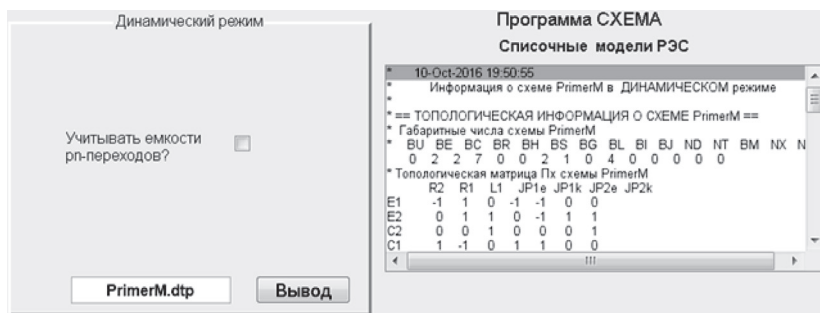


Рис. 2.7. Создание файла с описанием эквивалентной схемы в динамическом режиме

Нажатие кнопки **Вывод** задает команду на сохранение этой информации в текстовом файле с расширением **\*.dtp**. В других режимах работы исходной схемы информация сохраняется в файлах с расширениями:

- \*.stp** — эквивалентная схема по постоянному току;
- \*.lst** — линеаризованная эквивалентная схема.

Имена по умолчанию у всех трех файлов одинаковые, могут быть изменены пользователем, расширения имен изменять нельзя.

**Пример 2.1.** Формирование эквивалентной схемы по постоянному току

Перед выполнением этого задания по указаниям п. 1.2.5 сформирован текстовый файл **Prim1.lst** со списочной моделью исходной ПЭСх.

```
*          Создан  10.5.2016
*   Списочная модель электронной схемы  Prim1
*B      Y      ND      NT
  13    9      1      2
*   Списочная модель
*Элем   НУ    КУ      Параметр
E1      0     1        0.0
R1      2     3        100
C1      1     2         1.0
R2      2     0         10
R3      3     4        12.5
R4      3     5         2.8
R5      6     0         1.0
R6      7     0        10.0
C2      5     7          1
Q1      4     2         0 Qnom
Q2      5     4         6 Qnom
D1      8     3          Dnom
E2      0     8         12
```

После обращения к программе СХЕМА получен текстовый файл **Prim1M.lst** с описанием электронной схемы в виде набора идеальных элементов — двухполюсников. Буква **М** к имени файла добавляется всегда, однако это имя может быть отредактировано перед сохранением текстового файла.

```
*          12-Oct-2016 10:26:55
*          Создан  10.5.2016
*   Списочная модель электронной схемы  Prim
*      В      Y      ND      NT
      26     14      1      2      0      0
*Элем   НУ    КУ      Параметр
E1      0     1          0
R1      2     3        100
C1      1     2          1
R2      2     0         10
R3      3     4        12.5
R4      3     5         2.8
R5      6     0          1
R6      7     0         10
C2      5     7          1
Jp1e    12    10        0.0000      0
Jp1k     4    10        0.0000      0
```

Rb1	2	10	0.06	
Rc1	10	4	300	
Cc1	10	4	0.0001	
Re1	0	12	0.01	
Jp2e	13	11	0.0000	0
Jp2k	5	11	0.0000	0
Rb2	4	11	0.06	
Rc2	11	5	300	
Cc2	11	5	0.0001	
Re2	6	13	0.01	
Jpd1	9	3	0.0000	0
Rod1	8	9	0.005	
Cd1	9	3	1e-005	
Ryd1	9	3	1000	
E2	0	8	12	

Информация о схеме в статическом режиме при последовательном нажатии кнопок Показ списочной модели и Вывод сохранена в текстовом файле **Prim1.stp**.

```

*      11-May-2016 18:12:04
*      Информация о схеме PrimM в СТАТИЧЕСКОМ режиме
*
* == ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СХЕМЕ Prim1M ==
* Габаритные числа схемы Prim1M
*   BU   BE   BR   BG   BI   BJ   ND   NT   NX   NS
*     0    1   10    3    0    5    1    2    0    0
* Топологическая матрица Pх схемы Prim1M
*
*      Rc1  Rc2  Ryd1  Jpd1  Jp1e  Jp1k  Jp2e  Jp2k
E2      0    0    1    1    0    0    0    0
Rod1    0    0   -1   -1    0    0    0    0
Re1      0    0    0    0    1    0    0    0
Re2      0    0    0    0    0    0    1    0
Rb1     -1    0    0    0   -1   -1    0    0
Rb2      0   -1    0    0    0    0   -1   -1
R5       0    0    0    0    0    0   -1    0
R4       0    1    0    0    0    0    0    1
R2       0    0   -1   -1    1    0    1    0
R3       1   -1    0    0    0    1   -1   -1
R1       1    0    1    1    0    1   -1    0
* == ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СХЕМЕ Prim1M ==
* Вектор сопротивлений ребер R
0.005 0.01 0.01 0.06 0.06 1 2.8 10 12.5 100
* Вектор проводимостей хорд G

```

```

0.003333  0.003333      0.001
* Вектор напряжений независимых источников E
  12
* Вектор токов независимых источников I

* ===== ФОРМУЛЯР СХЕМЫ Prim1M =====
* Габаритные числа электронной схемы Prim1M
*      В      Y      ND      NT      NX      NS
      19      12      1       2       0       0
* Списочная модель схемы Prim1M
* Элем  НУ    КУ    Параметр
E2       0    6      12.0000      0.0000
Rod1     6    7       0.0050      0.0000
Re1      0   10       0.0100      0.0000
Re2      5   11       0.0100      0.0000
Rb1      1    8       0.0600      0.0000
Rb2      3    9       0.0600      0.0000
R5       5    0       1.0000      0.0000
R4       2    4       2.8000      0.0000
R2       1    0      10.0000      0.0000
R3       2    3      12.5000      0.0000
R1       1    2     100.0000      0.0000
Rc1      8    3     300.0000      0.0000
Rc2      9    4     300.0000      0.0000
Ryd1     7    2    1000.0000      0.0000
Jpd1     7    2       0.0000      0.0000
Jp1e     8   10       0.0000      0.0000
Jp1k     8    3       0.0000      0.0000
Jp2e     9   11       0.0000      0.0000
Jp2k     9    4       0.0000      0.0000

```

## 2.2. Указания к оформлению отчета

---

1. Исходная ПЭСх.
2. Содержание текстового файла со списочной моделью ПЭСх.
3. Содержание текстового файла со списочной моделью ПЭСх, представленной двухполюсниками (развернутой схемы).
4. Чертеж этой развернутой схемы, выполненный по нормам ЕСКД.
5. Три текстовых файла со списочными моделями эквивалентных схем: по постоянному току, в динамическом и линейном режимах.
6. Выводы и рекомендации по самостоятельной работе.

---

## Контрольные вопросы и задания

---

1. Поясните алгоритм работы программы СХЕМА.
2. При каком условии программа СХЕМА не сможет выделить топологическую матрицу  $P_x$ ?
3. Поясните алгоритм формирования эквивалентной схемы в динамическом режиме.
4. Поясните алгоритм формирования эквивалентной схемы в статическом режиме.
5. Поясните алгоритм формирования эквивалентной схемы в линейном режиме.
6. В каком режиме работы электронной схемы следует задавать вектор наблюдения?
7. В чем состоит сходство и различие списочных моделей электронных схем в программе СХЕМА и пакете PSpice? Ответьте на этот вопрос, сопоставив следующие свойства списочных моделей: описание элемента, описание узлов, описание модели элемента, порядок описания элементов в списке.
8. Поясните смысл символов, стоящих в начале строки файла описания схемы в пакете PSpice.
9. Перечислите соответствия символов латинского алфавита и типов радиокомпонентов в пакете PSpice.
10. Назовите основные непараметрические опции модуля PSpice.
11. Назовите основные параметрические опции модуля PSpice.
12. Каким образом в CIR-файле описываются модели активных компонентов?

### 3. Формирование математических моделей электронных схем в различных режимах

---

В главе приводятся указания для выполнения девятого индивидуального задания по самостоятельной работе (см. п. 1.1): машинному формированию математических моделей электронных схем. В качестве таких моделей выбраны системы уравнений электрического баланса электронной схемы в методе переменных состояния. Виды и размеры систем уравнений этих моделей различны и зависят от режима работы схемы. Например, девять матриц трех уравнений (свернутая форма математической модели схемы) в динамическом режиме определяются с помощью программ СХЕМА и СИСТЕМА (рис. 3.1) и запоминаются в файле с расширением **\*.dmc**. Аналогичным образом с помощью программы СИСТЕМА формируются математические модели в статическом и линейном режимах.

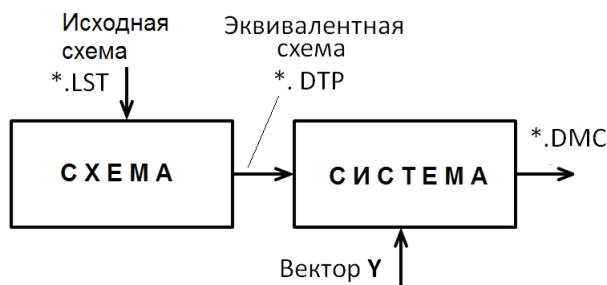


Рис. 3.1. Связи между программами пакета АНАЛИЗ при формировании математической модели схемы в динамическом режиме

#### 3.1. Интерфейс программы СИСТЕМА

---

Работа с программой СИСТЕМА во многом схожа с работой в программе СХЕМА: их интерфейсы по построению и последовательности выполняемых действий практически совпадают. Сначала ввод исход-



ных файлов, затем настройка параметров режима работы схемы, далее преобразование топологической и параметрической информации в матрицы и векторы математических моделей и последующее сохранение модели в одном из трех видов файлов:

- \* **.smc** — статическая математическая модель электронной схемы;
- \* **.dmc** — динамическая математическая модель электронной схемы;
- \* **.lmc** — линеаризованная математическая модель электронной схемы.

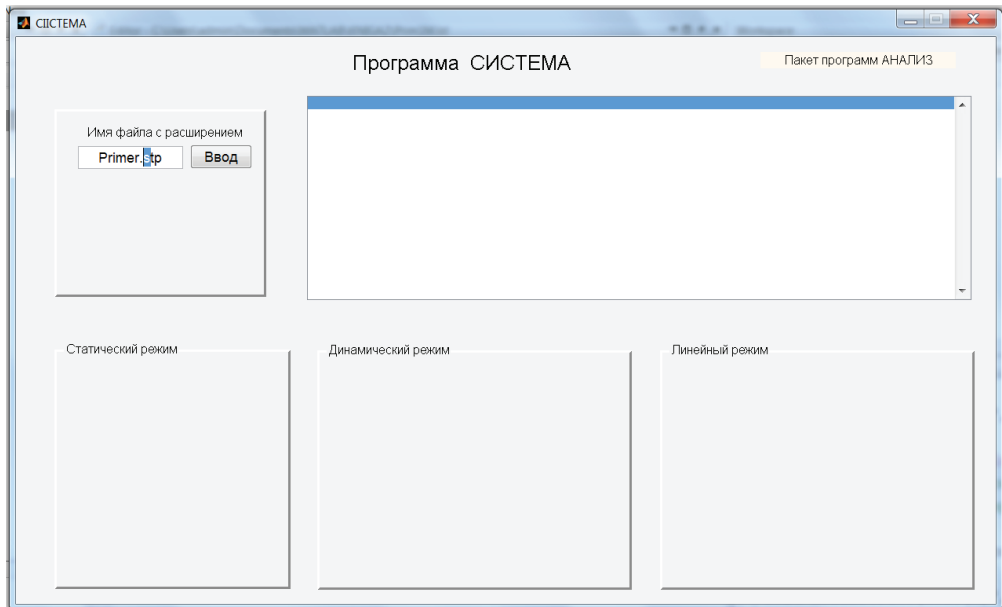


Рис. 3.2. Начальный вид интерфейса программы СИСТЕМА

Формирование математических моделей для каждого режима работы схемы проводится индивидуально. Выделенная в редакторе имени входного файла первая буква расширения (**s**, **d** или **l**) задает режим работы схемы. По умолчанию установлена буква **s**, т. е. будет проводиться формирование модели в статическом режиме.

После выбора режима, например динамического, и ввода файла с топологической и параметрической информацией о схеме на панели динамического режима появляется вставка для формирования выходного вектора **Y**. Число элементов этого вектора ограничено четырьмя, состав определяется по правилу: сначала указывается символ **U** (напряжение) или **I** (ток), затем имя того элемента, электрические параме-

тры которого требуется наблюдать во времени. Это имя должно текстуально совпадать с обозначениями элементов — строк и столбцов матрицы  $P_x$ , показанной в окне многострочного редактора, например, как у третьего элемента вектора  $Y: Y(3) = I(Jp2)$ , т.е.  $I(Jp2)$ . Возможно использовать масштабный множитель, как это показано на рис. 2.3 и рис. 2.4 в описании элемента  $Y(4) = 10 * I(R6)$ . Если в составе вектора наблюдения  $Y$  меньше четырех элементов, то последние поля не заполняются, а символы, вставленные в них по умолчанию, исключаются.

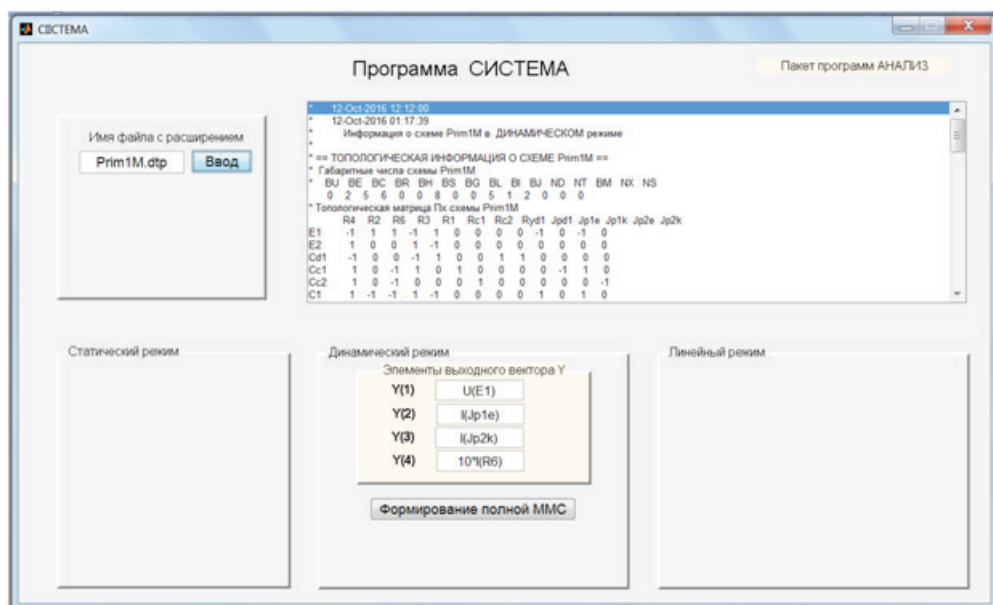


Рис. 3.3. Ввод информации о схеме в динамическом режиме

После нажатия на кнопку **Формирование полной ММС** в многострочном окне отображения появляются (см. рис. 3.4): список всех элементов с указанием параметров, 15 матриц полной математической модели и содержание двух векторов: вектора состояния и вектора управления. Эта информация по умолчанию сохраняется в текстовом файле с расширением **\*.pmc**. Имя этого файла — как всегда по умолчанию имя модифицированной схемы, т.е. исходной схемы с добавлением буквы **М**.

Формирование итоговой — свернутой — математической модели выполняется программой СИСТЕМА при нажатии кнопки **Форми-**

рование свернутой ММС. В многострочном окне отображения снова появляются (рис. 3.5): список всех элементов с указанием параметров, 9 матриц свернутой математической модели и дополнительная информация для решения свернутой модели — вектор начального состояния и величина относительной погрешности.

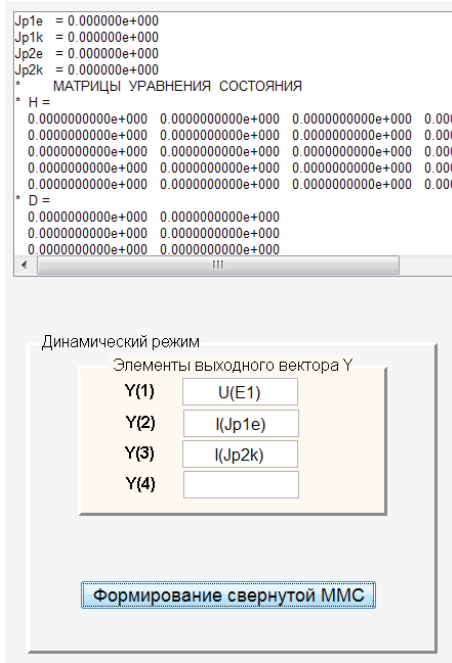


Рис. 3.4. Формирование вектора наблюдения в динамическом режиме

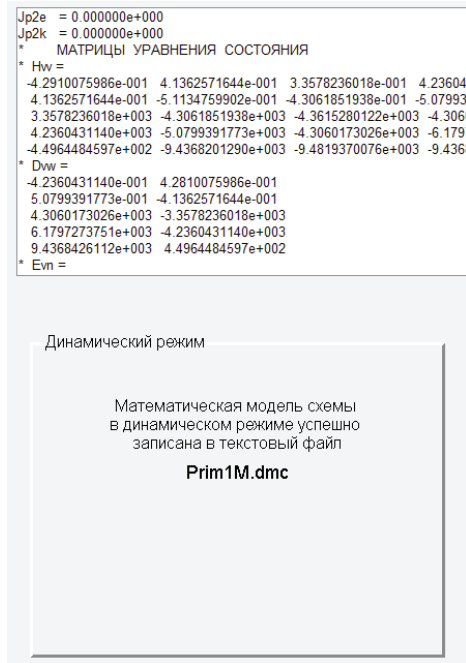


Рис. 3.5. Сообщение о создании свернутой ММС в динамическом режиме

Аналогичным образом выполняются последовательности команд управления интерфейсом программы СИСТЕМА для других режимов работы.

### Пример 3.1. Формирование математической модели линеаризованной схемы

Исходной информацией о схеме в этом случае является содержание файла **Prim1.ltp**. Поэтому в расширении имени входного файла буква **s** заменяется на букву **l** и нажимается кнопка **Ввод**. На панели **Линейный режим** появляется изображение, по форме и содержанию точно совпадающее с изображением, показанным ранее на рис. 3.4. Необходимо по указанным выше правилам сформировать содержа-

ние выходного вектора и нажать кнопку **Формирование полной ММС**. Результатом будет создание текстового файла с расширением **\*.plc**, в котором сохраняется информация о полной линейной математической модели схемы. Одновременно с записью файла в рабочем пространстве системы MATLAB появляется два числовых массива: **T** — матрица системы линейных уравнений, **Dw** — вектор свободных членов. Система линейных уравнений имеет вид:  $\mathbf{T} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{Dw} \cdot \mathbf{W}$ , где вектор  $\mathbf{X} = [\mathbf{V}; \mathbf{S}; \mathbf{P}]$  — искомый вектор состояния, зависимых источников и резистивностей: вектор  $\mathbf{W}$  — вектор управления или входных воздействий.

Ниже приводится укороченный текст полной математической модели (во всех матрицах представлена только первая строка).

```
*      12-Oct-2016 15:23:27
*      ЛИНЕЙНАЯ ПОЛНАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМЫ  Prim1
*      ГАБАРИТНЫЕ ЧИСЛА СХЕМЫ  Prim1
*      BU  VE  BC  BR  BH  BS  BG  BL  BI  BJ  ND  NT  BM  BY
*      0   1   5   4   0   0  10   0   0   2   1   2   0   3
*      ОБОЗНАЧЕНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ
E1      = 0.000000e+000
Cdin1   = 0.000000e+000
Cc1      = 1.000000e-004
Cc2      = 1.000000e-004
C1       = 1.000000e+000
C2       = 1.000000e+000
Rd1      = 1.000000e-002
Rb1      = 6.000000e-002
Rb2      = 6.000000e-002
R5       = 1.000000e+000
Re1      = 1.500000e+000
Re2      = 1.500000e+000
R4       = 2.800000e+000
R2       = 1.000000e+001
R6       = 1.000000e+001
R3       = 1.250000e+001
R1       = 1.000000e+002
Rc1      = 3.000000e+002
Rc2      = 3.000000e+002
Rdin1    = 1.000000e+003
Jq1      = 0.000000e+000
Jq2      = 6.000000e+000
*      МАТРИЦЫ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ
*      H =
```

```

0.0000000000e+000  0.0000000000e+000  0.0000000000e+000 . . .
* D =
0.0000000000e+000
* E =
0.0000000000e+000  0.0000000000e+000
* F =
0.0000000000e+000  0.0000000000e+000  0.0000000000e+000 . . .
*      МАТРИЦЫ УРАВНЕНИЯ АРГУМЕНТОВ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ
* Hn =
0.0000000000e+000  0.0000000000e+000  0.0000000000e+000
0.0000000000e+000
* Dn =
0.0000000000e+000
* En =
0.0000000000e+000  0.0000000000e+000
* Fn =
0.0000000000e+000  0.0000000000e+000  0.0000000000e+000 . . .
*      МАТРИЦЫ УРАВНЕНИЯ РЕЗИСТИВНОСТЕЙ
* Hp =
-3.8483593189e-003  1.8837815864e-003  2.7822807906e-003 . . .
* Dp =
-9.9615164068e-005
* Ep =
0.0000000000e+000  1.6302089004e-003
*      МАТРИЦЫ УРАВНЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЯ
* Hy =
0.0000000000e+000  0.0000000000e+000  0.0000000000e+000 . . .
* Dy =
1.0000000000e+000
* Ey =
0.0000000000e+000  0.0000000000e+000
* Fy =
0.0000000000e+000  0.0000000000e+000  0.0000000000e+000 . . .

*      ВЕКТОР УПРАВЛЕНИЯ W =
E1
*      ВЕКТОР НАБЛЮДЕНИЯ Y =
U(E1)
I(Jq1)
I(Jq2)
*      ВЕКТОР СОСТОЯНИЯ V =
Cdin1
Cc1
Cc2
C1
C2

```

При нажатии на появившуюся кнопку **Формирование полной ММС** на экране возникает модальное окно с вопросом о характере линейной связи аргументов и функций зависимых источников (рис. 3.6). Если эта связь для всех элементов векторов  $\mathbf{S} = \mathbf{E_s} * \mathbf{N}$  единичная, то по умолчанию принимается, что матрица  $\mathbf{E_s}$  также единичная. Если же, например, у транзистора она равна  $\mathbf{B_r} = 100$ , то это число должно отображаться в новом модальном окне, в котором задаются числовые значения элементов главной диагонали матрицы  $\mathbf{E_s}$ .

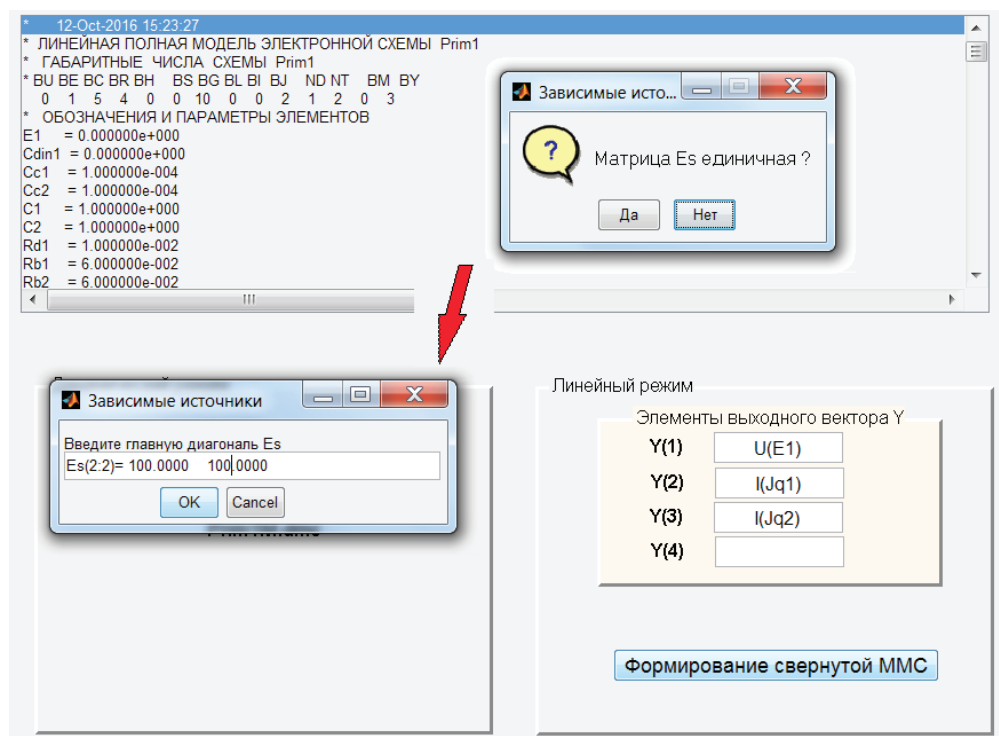


Рис. 3.6. Формирование полной ММС в линейном режиме

Окончательный вид математической (свернутой) модели в линейном режиме работы схемы приведен ниже. В ней имеются четыре матрицы — две ( $\mathbf{H1}$  и  $\mathbf{D1}$ ) от уравнения состояния и две ( $\mathbf{Hy1}$  и  $\mathbf{Dy1}$ ) от уравнения наблюдения. Большое число десятичных знаков в представлении чисел в текстовом файле необходимо для переноса информации между программами пакета АНАЛИЗ без потерь в точности расчетов.

```

*      12-Oct-2016 15:44:28
*      МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМЫ Prim1
*      BV      BW      BY
*      5      1      3
*      МАТРИЦЫ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ
*      H1 =
-3.8583593189e+005      1.8837815864e+005      2.7822807907e+005
9.9615164069e+003      -1.6954205167e+004
      1.4490627588e+003      -4.0628399470e+003      -1.0702544654e+003
1.4490627588e-001      -2.3527216549e+002
      2.1402159928e+003      -1.0702544653e+003      -2.7697926618e+003
2.1402159928e-001      -6.0201201303e+002
      9.9615164068e-003      1.8837815864e-005      2.7822807906e-005
-7.5105546336e-001      -1.6954205168e-006
      -1.6954205168e-002      -3.0585381515e-002      -7.8261561693e-002
-1.6954205168e-006      -9.5231025646e-002
*      D1 =
-9.9615164069e+003
-1.4490627588e-001
-2.1402159928e-001
7.5105546336e-001
1.6954205168e-006
*      МАТРИЦЫ УРАВНЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЯ
*      Hy1 =
0.0000000000e+000      0.0000000000e+000      0.0000000000e+000
0.0000000000e+000      0.0000000000e+000
      0.0000000000e+000      0.0000000000e+000      0.0000000000e+000
0.0000000000e+000      0.0000000000e+000
      0.0000000000e+000      0.0000000000e+000      0.0000000000e+000
0.0000000000e+000      0.0000000000e+000
*      Dy1 =
1.0000000000e+000
0.0000000000e+000
0.0000000000e+000
*      ВЕКТОР УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СХЕМЫ W =
E1
*      ВЕКТОР НАБЛЮДЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СХЕМЫ Y =
U(E1)
I(Jq1)
I(Jq2)
*      ВЕКТОР СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СХЕМЫ V =
Cdin1
Cc1
Cc2
C1
C2

```

### 3.2. Указания к оформлению отчета

---

1. Рисунок исходной (заданной) ПЭСх.
2. Содержание текстового файла со списочной моделью заданной ПЭСх.
3. Содержание текстового файла со списочной моделью эквивалентной схемы в динамическом режиме.
4. Чертеж эквивалентной схемы, выполненный по нормам ЕСКД.
5. Два текстовых файла со списочными моделями эквивалентных схем — по постоянному току и в линейном режиме.
6. Выводы и рекомендации по самостоятельной работе.

### Контрольные вопросы и задания

---

1. Назовите основные действия пользователя программы СИСТЕМА при формировании математической модели схемы в статическом режиме.
2. Какие действия со списочной моделью заданной схемы выполняет программа СИСТЕМА при определении списочной модели в статическом режиме?
3. Назовите действия пользователя программы СИСТЕМА при формировании математической модели электронной схемы в динамическом режиме.
4. Какие действия со списочной моделью заданной схемы выполняет программа СИСТЕМА при формировании списочной модели в динамике?
5. Поясните алгоритм перехода от полной модели к свернутой модели в динамическом режиме.
6. Назовите основные разделы — группы матриц и векторов — в составе свернутого варианта списочной модели в динамическом режиме.
7. Можно ли в программе СИСТЕМА в составе выходного вектора задать расчет временной зависимости напряжения на индуктивности или тока емкости?



8. Назовите действия пользователя программы СИСТЕМА при формировании математической модели электронной схемы в линейном режиме.
9. Какие действия со списочной моделью заданной схемы выполняет программа СИСТЕМА при определении списочной модели в линейном режиме?
10. Назовите основные разделы — группы матриц и векторов — в составе свернутого варианта списочной модели в линейном режиме.
11. Поясните алгоритм формирования матриц уравнения состояния в линейном режиме.
12. Поясните алгоритм формирования матриц уравнения наблюдения в линейном режиме.

## 4. Анализ электронных схем в статическом режиме

---

Компьютерный анализ электронной схемы начинается с расчета токов и напряжений в статическом режиме, что составляет суть десятого индивидуального задания по самостоятельной работе (см. п. 1.1). Перед его выполнением необходимо изучить методы формирования математических моделей в статическом режиме, методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений (СНЛАУ). Следует ознакомиться со структурой алгоритмов простой итерации и Ньютона-Рафсона, рассмотреть примеры численного решения задач анализа электронных схем по постоянному току.

Для программы СТАТИКА с помощью программ СХЕМА и СИСТЕМА (рис. 4.1) нужно подготовить входную информацию об электронной схеме в статическом режиме (файл **\*.stp** — результат выполнения восьмого индивидуального задания, см. гл. 3).

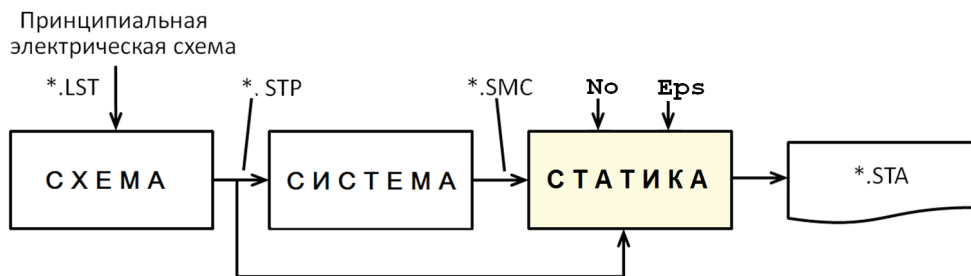


Рис. 4.1. Связи между программами пакета АНАЛИЗ

При подготовке входной информации учесть следующее:

- а) в исходной электронной схеме из активных элементов должны быть только полупроводниковые диоды и биполярные транзисторы;
- б) при удалении емкостей схема не должна распадаться на несколько независимых подсхем;

в) все действия по созданию входного для программы СТАТИКА файла с расширением **\*.stp** выполнять с помощью программы СХЕМА и в дальнейшем его не редактировать.

Далее следует определить начальное приближение для вектора аргументов нелинейностей **No** и абсолютную погрешность **Eps** решения СНЛАУ.

## 4.1. Интерфейс программы СТАТИКА

Интерфейс программы СТАТИКА (рис. 4.2) отличается от интерфейсов предыдущих программ СХЕМА и СИСТЕМА большей сложностью и числом управляющих элементов.

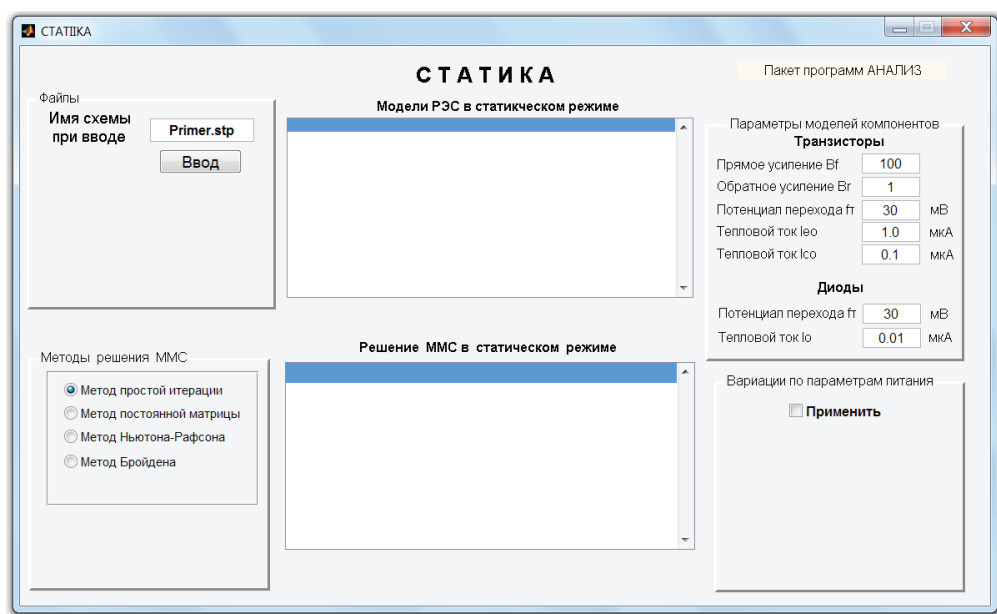


Рис. 4.2. Начальное состояние интерфейса программы СТАТИКА

Он содержит четыре панели и два окна для показа многострокового текста. Главной панелью интерфейса является панель **Методы решения ММС** для выбора методов решения математической модели, представленной здесь системой нелинейных алгебраических уравнений. Управление процессом этого решения следует проводить с по-

мощью нижней правой панели Вариации по напряжению питания. На верхней правой панели Параметры моделей компонентов можно задавать параметры моделей Эберса—Молла биполярных транзисторов и полупроводниковых диодов. Панель Файлы предназначена, как и в ранее представленных интерфейсах, для чтения и записи информационных файлов.

После ввода **stp**-файла с топологической и параметрической информацией о схеме в верхнем окне интерфейса появляется текст этого файла и на панели становится видимой кнопка Формирование MMC. Редактировать текст файла невозможно. Нажатие этой кнопки приводит к расчету статической матрицы **Enn** и вектора влияния **Nw**, т. е. к формированию математической модели схемы в статическом режиме и показу ее в верхнем окне интерфейса (рис. 4.3).

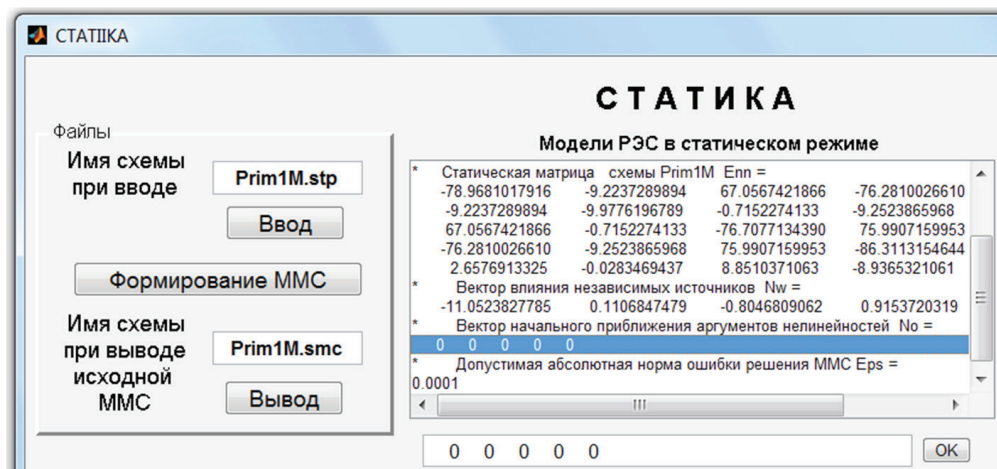


Рис. 4.3. Результат обработки кнопки Формирование MMC

Одновременно с этим под окном появляется однострочный редактор, с помощью которого можно изменить (исправить) те или иные данные, например, задать новый — ненулевой — вектор начального приближения **No**. Операции с этим редактором и кнопкой **ОК** уже описаны выше. Кроме того, имеется возможность сохранить отредактированную математическую модель в файле с расширением **\*.smc**. При этом нажатие кнопки **Ввод** делает видимым кнопку **Решение MMC** (см. рис. 4.4), с помощью которой в нижнем окне отображается процесс решения MMC при последовательном увеличении напряжения питания.

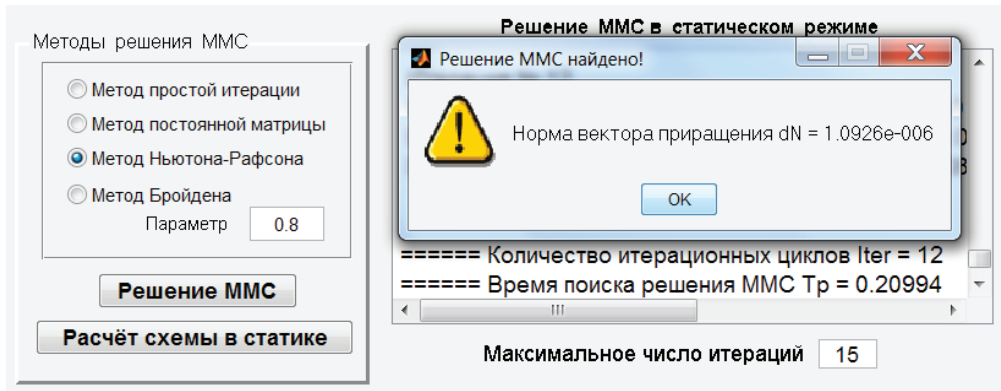


Рис. 4.4. Результат обработки кнопки Решение ММС

Параметры метода вариации по напряжению питания могут быть изменены при включении отметки на правой нижней панели (рис. 4.5). Кроме того, на каждой вариации число итераций по поиску решения нелинейной системы ограничивается величиной, равной 15 по умолчанию. Эта величина может быть изменена, чаще в большую сторону, при неудачном решении ММС. Можно также повторить процесс решения при другом законе изменения напряжения источника питания.

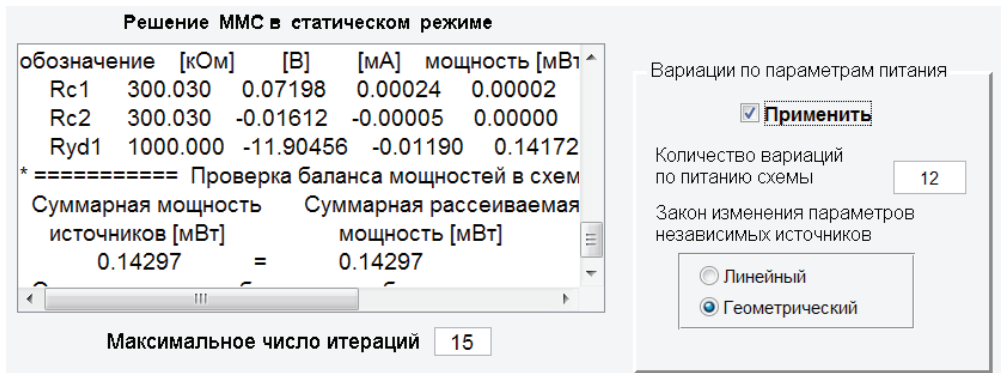


Рис. 4.5. Результат расчета схемы по постоянному току

Возникающее в конце решения ММС модальное окно содержит информацию о точности решения и служит своего рода признаком правильности вычислительного процесса. При правильном решении на нем отображается норма вектора приращения, меньшая заданной величины **Eps**. Окно убирается с экрана обычным способом.

После получения правильного решения ММС по кнопке **Расчет схемы в статике** в нижнем окне отображается информация о рабочих точках диодов и транзисторов, электрических параметрах (падениях напряжений и токах) элементов эквивалентной схемы, балансе потребляемой и рассеиваемой мощности постоянного тока.

Содержание верхнего (ММС в статическом режиме) и нижнего (результаты определения напряжений и токов в статике) окон следует сохранить, нажав кнопку **Вывод** на верхней панели **Файлы**.

**Пример 4.1.** Входная информация для программы СТАТИКА (исходная схема показана на рис. 4.6).

В исходной схеме имеется один полупроводниковый диод, два транзистора проводимости **nnp**, 6 резисторов и два источника напряжения (воздействия и питания). После подстановки схем замещения в эквивалентной схеме (**stp**-файл) появится 5 зависимых источников тока и 13 сопротивлений. Параметры радиокомпонентов нужно вводить в масштабе: вольт, килоом, миллиампер.

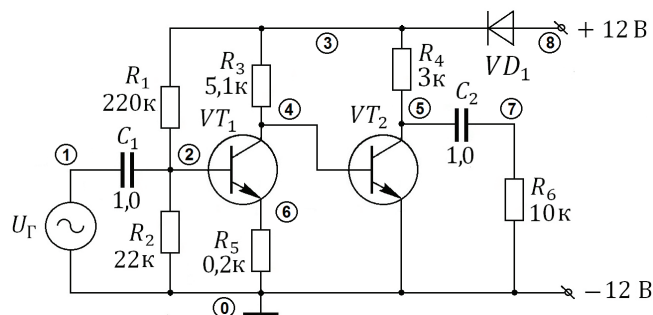


Рис. 4.6. Исходная принципиальная электрическая схема двухкаскадного усилителя и его списочная модель

```
*Списочная модель
схемы Prim1
*В Y ND NT
13912
*Элем НУ КУ Параметр
E1010.0
R123220
C1121.0
R22022
R3345.1
R4353
R5600.2
R67010.0
C2571
Q1n 426 Qnom
Q2n 540 Qnom
D183 Dnom
E20812
```

Для выполнения расчетов статического режима схемы на панели **Параметры моделей компонентов** интерфейса программы СТАТИКА задать параметры инжекционных моделей транзисторов (в скобках даны по умолчанию):

**Br** — коэффициент прямого усиления по схеме с ОЭ (100);  
**Bf** — коэффициент обратного усиления по схеме с ОЭ (1);  
**mft** — температурный потенциал обоих переходов (0.030);  
**Ieo** — обратный тепловой ток перехода Э-Б (1E-6);  
**Iko** — обратный тепловой ток перехода К-Б (1E-4);  
 и модели диода  
**mft** — температурный потенциал *pn*-перехода (0.030);  
**Io** — обратный тепловой ток *pn*-перехода (1e-7).

При выборе этих параметров следует учесть ограничения:

$Br > 0$ ;  $Bf > 0$ ;  $0.01 < mft < 0.1$ ;  $1e-12 < Io, Ieo, Iko < 1e-3$ .

Проведем расчет статического режима сначала для германиевых транзисторов и диодов, затем для кремниевых, записывая результаты расчетов в выходной файл с расширением **\*.sta**. Для этого выберем метод Ньютона-Рафсона для решения ММС при числе вариаций по напряжению питания 12.

При нажатии на кнопку **Расчет схемы** в статике информация о результатах автоматически запишется в файле, имя которого указано на панели **Файлы**. При успешном расчете статического режима результаты сохраним в файле **Primlg.sta** для германиевых и в файле **Primls.sta** для кремниевых транзисторов.

```

* МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМЫ PrimlM В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ
* Габаритные числа схемы PrimlM
*   BU   BE   BR   BG   BI   BJ   ND   NT
*   0     1   10    3    0    5    1    2
*   Статическая матрица схемы PrimlM
Enn =
-130.3085372634   19.1550743107 -109.3215846713  128.4770207617 -1.8090790629
  19.1550743107 -21.8480999930   -2.4421052141 -19.1959866972 -0.0404125263
-109.3215846713  -2.4421052141 -114.8597294688  112.4170114678   3.0642408443
 128.4770207617 -19.1959866972  112.4170114678 -131.6823656133 -3.1630748808
 -1.8090790629  -0.0404125263   3.0642408443  -3.1630748808 -7.8932384973
*   Вектор влияния независимых источников
Nw =
 10.4362975528   0.2298608917  -1.3118590161   1.5417242491  -0.0217089488
*   Вектор начального приближения аргументов нелинейностей
No =
    0         0         0         0         0
*   Допустимая абсолютная норма ошибки решения ММС
Eps =
0.0001
  
```

Сравнение результатов расчета для двух типов транзисторов и диодов приведено в табл. 4.1. Данные левого столбца относятся к германиевым моделям.

Таблица 4.1

**Сравнение результатов расчета электронной схемы  
для двух типов проводимостей транзисторов**

<p>* ===== РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА Primlg В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ =====</p> <p>* 14-Oct-2016 00:15:01</p> <p>== Решение методом Ньютона-Рафсона ==</p> <p>Вариация № 1</p> <p>Вектор влияния источников</p> <p>Nw = 0.0050958 0.00011224 -0.00064056</p> <p>0.0007528 -1.06e-005</p> <p>Вектор аргументов предыдущий</p> <p>No = 0 0 0 0 0</p> <p>Вектор аргументов следующий</p> <p>N1 = 0.0056898 2.8157e-005 -0.00013148</p> <p>0.00015982 6.1067e-006</p> <p>Вектор приращения</p> <p>DeltaN = 0.0056898 2.8157e-005 -0.0001314</p> <p>0.00015982 6.1067e-006</p> <p>Норма вектора приращения</p> <p>DeltaN = 0.0056937</p> <p>Норма вектора решения MMC</p> <p>dN = 6.0101e-006</p> <p>Количество итераций при решении</p> <p>NIter = 2</p> <p>.....</p> <p>Вариация № 12</p> <p>Вектор влияния источников</p> <p>Nw = 10.4363 0.229861 -1.31186 1.54172</p> <p>-0.0217089</p> <p>Вектор аргументов предыдущий</p> <p>No = 0.37774 0.19767 0.073609 0.23474</p> <p>0.26121</p> <p>Вектор аргументов следующий</p> <p>N1 = 0.39964 0.21809 0.16432 0.25785</p> <p>0.28843</p> <p>Вектор приращения</p> <p>DeltaN = 0.021904 0.020419 0.090712</p> <p>0.023105 0.027213</p> <p>Норма вектора приращения</p> <p>DeltaN = 0.10198</p> <p>Норма вектора решения MMC</p> <p>dN = 2.5317e-006</p> <p>Количество итераций при решении</p> <p>NIter = 8</p> <p>= Количество итерационных циклов Iter = 58</p> <p>=== Время поиска решения MMC Tr = 0.028191</p> <p>* ===== Рабочие точки диодов =====</p> <p>Jpd1</p> <p>Uop 0.39964 [В]</p> <p>Iop 6.10059 [мА]</p> <p>Pop 2.43804 [мВт]</p>	<p>* ===== РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА Primls В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ =====</p> <p>* 14-Oct-2016 00:49:51</p> <p>== Решение методом Ньютона-Рафсона ==</p> <p>Вариация № 1</p> <p>Вектор влияния источников</p> <p>Nw = 1.9906e-005 4.3842e-007 -2.5022e-</p> <p>006 2.9406e-006 -4.1407e-008</p> <p>Вектор аргументов предыдущий</p> <p>No = 0 0 0 0 0</p> <p>Вектор аргументов следующий</p> <p>N1 = 1.9906e-005 4.3844e-007 -2.5022e-</p> <p>006 2.9407e-006 -4.1408e-008</p> <p>Вектор приращения</p> <p>DeltaN = 1.9906e-005 4.3844e-007</p> <p>- 2.5022e-006 2.9407e-006 -4.1408e-008</p> <p>Норма вектора приращения</p> <p>DeltaN = 2.0281e-005</p> <p>Норма вектора решения MMC</p> <p>dN = 2.0281e-005</p> <p>Количество итераций при решении</p> <p>NIter = 1</p> <p>.....</p> <p>Вариация № 20</p> <p>Вектор влияния источников</p> <p>Nw = 10.4363 0.229861 -1.31186</p> <p>1.54172 -0.0217089</p> <p>Вектор аргументов предыдущий</p> <p>No = 0.65143 0.50447 -0.30338 0.7285</p> <p>0.77567</p> <p>Вектор аргументов следующий</p> <p>N1 = 0.67471 0.68543 -0.0067675</p> <p>0.74518 0.78491</p> <p>Вектор приращения</p> <p>DeltaN = 0.023279 0.18096 0.29662</p> <p>0.016673 0.0092417</p> <p>Норма вектора приращения</p> <p>DeltaN = 0.34876</p> <p>Норма вектора решения MMC</p> <p>dN = 2.5794e-005</p> <p>Количество итераций при решении</p> <p>NIter = 15</p> <p>= Количество итерационных циклов Iter = 82</p> <p>=== Время поиска решения MMC Tr = 0.037523</p> <p>* ===== Рабочие точки диодов =====</p> <p>Jpd1</p> <p>Uop 0.67471 [В]</p> <p>Iop 5.85347 [мА]</p> <p>Pop 3.94939 [мВт]</p>
---	---



Окончание табл. 4.1

* ===== Рабочие точки транзисторов =====				
	Jp1e	Jp1k	Jp2e	Jp2k
Uop	0.21809	0.16432	0.25785	0.28843
[B]				
Iop	1.42295	-1.39683	4.65448	-3.85226
[mA]				
Pop	0.31032	-0.22953	1.20015	-1.11109
[мВт]				
* == Матрица Якоби в рабочей точке ==				
203.35350	0.00000	0.00000	0.00000	
0.00000				
0.00000	47.8619	-0.39869	0.00000	
0.00000				
0.00000	-47.38809	0.79739	0.00000	
0.00000				
0.00000	0.00000	0.0000	180.14004	
-24.959				
0.00000	0.00000	0.000	-178.356484	
9.9182				
* ===== Данные сопротивлений ребер =====				
Поз.об.	Параметр	Напряжение	Ток	Мощность
	[кОм]	[В]	[mA]	[мВт]
Rod1	0.005	0.03050	6.10099	0.18611
Re1	0.010	0.01423	1.42295	0.02025
Re2	0.010	0.04654	4.65448	0.21664
Rb1	0.060	-0.00160	-0.02667	0.00004
Rb2	0.060	-0.04819	-0.80318	0.03871
R5	0.200	-0.28459	-1.42295	0.40496
R4	3.000	-11.55389	-3.85130	44.49744
R3	5.100	-11.21727	-2.19947	24.67200
R2	22.000	-0.51850	-0.02357	0.01222
R1	220.000	11.05135	0.05023	0.55515
* ===== Данные проводимостей хорд =====				
Поз.об.	Параметр	Напряжение	Ток	Мощность
	[кОм]	[В]	[mA]	[мВт]
Rc1	300.030	-0.16432	-0.00055	0.00009
Rc2	300.030	-0.28843	-0.00096	0.00028
Ryd1	1000.000	0.39964	0.00040	0.00016
* == Проверка баланса мощностей в схеме ==				
Мощность источников		Рассеиваемая мощность		
73.21193 [мВт]		= 73.21193[мВт]		
Относительная ошибка проверки баланса				
мощностей 3.80964e-011				

* ===== Рабочие точки транзисторов =====				
	Jp1e	Jp1k	Jp2e	Jp2k
Uop	0.68543	-0.00677	0.74518	0.78491
[B]				
Iop	0.83681	-0.82853	4.97817	
-3.76461 [mA]				
Pop	0.57358	0.00561	3.70961	
-2.955 [мВт]				
* == Матрица Якоби в рабочей точке ==				
195.1157	0.0000	0.0000	0.0000	
0.00000				
0.0000	27.89371	-0.00000	0.00000	
0.00000				
0.0000	-27.61753	0.00000	0.00000	
0.00000				
0.00000	0.00000	0.000	204.36747	
-38.428				
0.00000	0.00000	0.00	-202.34403	
76.8571				
* Электрические данные сопротивлений ребер				
Поз.об.	Параметр	Напряжение	Ток	Мощность
	[кОм]	[В]	[mA]	[мВт]
Rod1	0.005	0.02927	5.85415	0.17136
Re1	0.010	0.00837	0.83681	0.00700
Re2	0.010	0.04978	4.97817	0.24782
Rb1	0.060	-0.0005	-0.00826	0.00000
Rb2	0.060	-0.07297	-1.21618	0.08874
R5	0.200	-0.16736	-0.83681	0.14005
R4	3.000	-11.28598	-3.76199	42.45776
R3	5.100	-10.42809	-2.04472	21.32257
R2	22.000	-0.86165	-0.03917	0.03375
R1	220.000	10.43433	0.04743	0.49489
* Электрические данные проводимостей хорд				
Поз.об.	Параметр	Напряжение	Ток	Мощность
	[кОм]	[В]	[mA]	[мВт]
Rc1	300.030	0.00674	0.00002	0.00000
Rc2	300.030	-0.78491	-0.00262	0.00205
Ryd1	1000.000	0.67475	0.00067	0.00046
* == Проверка баланса мощностей в схеме ==				
Мощность источников		Рассеиваемая мощность		
70.24974 [мВт]		= 70.24974 [мВт]		
Относительная ошибка проверки баланса				
мощностей 3.41164e-009				

## 4.2. Указания к оформлению отчета

1. Исходная ПЭСх.
2. Содержание текстового файла со списочной моделью ПЭСх.
3. Содержание текстового файла с эквивалентной схемой в статическом режиме, представленной двухполюсниками.

4. Чертеж этой эквивалентной схемы, выполненный по нормам ЕСКД.
5. Матрицы и векторы математической модели электронной схемы в режиме по постоянному току.
6. Текстовый файл с содержанием результатов анализа схемы по постоянному току при различных вариантах решения.
7. Графики зависимостей токов транзисторов от величины напряжения источника питания.
8. Выводы и рекомендации по самостоятельной работе.

### Контрольные вопросы и задания

---

---

1. Поясните по блок-схеме работу программы СТАТИКА.
2. Сравните по скорости и области сходимости метод простой итерации и метод Зейделя.
3. Сравните по скорости и области сходимости метод простой итерации и метод Ньютона—Рафсона.
4. Назовите модификации метода Ньютона—Рафсона.
5. Назовите экономичные способы вычисления вектора приращений  $\Delta N$  в методе Ньютона—Рафсона.
6. Почему матрица Якоби уравнения статического режима всегда обратима?
7. Каким образом можно избавиться от нарушений законов Кирхгофа при формировании топологической матрицы схемы в статическом режиме?
8. Укажите формы задания режима анализа схемы по постоянному току в модуле PSpice: входная и выходная информация, варианты анализа.
9. Как определить по результатам расчетов коэффициент усиления транзистора по постоянному току?
10. Пояснить поведение зависимости коллекторного тока транзистора от величины напряжения питания (в режиме, близком к нормальному).

## 5. Анализ электронных схем в динамическом режиме

---

**К**омпьютерный расчет и анализ временных зависимостей токов и напряжений в электронной схеме — это выполнение одиннадцатого индивидуального задания по самостоятельной работе (см. п. 1.1). Предварительно студенту необходимо изучить методы формирования и решения математических моделей электронных схем в динамическом режиме. Он должен иметь представление о применении методов численного интегрирования систем однородных дифференциальных уравнений первого порядка: явного и неявного методов Эйлера, метода трапеций, явного метода Рунге–Кутты четвертого порядка, линейных многошаговых методов. Для каждого метода необходимо знать ограничения на величину шага интегрирования и зависимость локальной и глобальной ошибок от его величины. По матрице состояния  $\mathbf{H}\mathbf{v}\mathbf{v}$  свернутой модели электронной схемы вычислить все постоянные времени по формуле  $\mathbf{Tau}[\mathbf{i}] = -1/\mathbf{H}\mathbf{v}\mathbf{v}[\mathbf{i}, \mathbf{i}]$ ,  $\mathbf{i}=1 \dots \mathbf{BV}$ , и выбрать среди них минимальную и максимальную постоянные времени. Нулевые и бесконечно большие значения  $\mathbf{Tau}[\mathbf{i}]$  в расчет не принимать.

Для программы ДИНАМИКА необходимо подготовить с помощью программ СХЕМА и СИСТЕМА (см. рис. 5.1) входную информацию об электронной схеме в динамическом режиме. При формировании эквивалентной схемы в программе СХЕМА учесть особенности схемной топологии: при попадании емкости в хорды графа последовательно с этой емкостью включить малое по величине ( $\sim 1$  Ом) сопротивление, при попадании индуктивности в ребра графа параллельно ей включить в схему большое по величине (до 1 МОм) сопротивление. В программе СИСТЕМА вектор наблюдения  $\mathbf{Y} = [\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_n]^T$  должен содержать до четырех элементов, первым из которых ( $\mathbf{y}_1$ ) должно быть входное воздействие (обычно напряжение независимого источника

$U_{\text{в1}}(t)$ ). Последний элемент  $y_n$  вектора  $\mathbf{Y}$  должен иметь смысл выходного отклика, например, напряжение на сопротивлении нагрузки  $U_{\text{РН}}$ . Например, вторым элементом ( $y_2$ ) можно задать базовый ток одного из транзисторов (лучше последнего по схеме), третьим элементом ( $y_3$ ) — коллекторный ток этого транзистора.

Для программы ДИНАМИКА задать начальные условия на реактивностях схемы (вектор  $\mathbf{V}_0$ ): напряжения на емкостях и токи индуктивностей в момент времени  $t_n = 0$ . Определить начальное приближение для вектора аргументов нелинейностей  $\mathbf{N}_0$  и абсолютную погрешность  $\mathbf{Eps}$  решения системы нелинейных алгебраических уравнений на каждом шаге интегрирования. При подготовке информации учесть ограничения, указанные в предыдущем разделе.

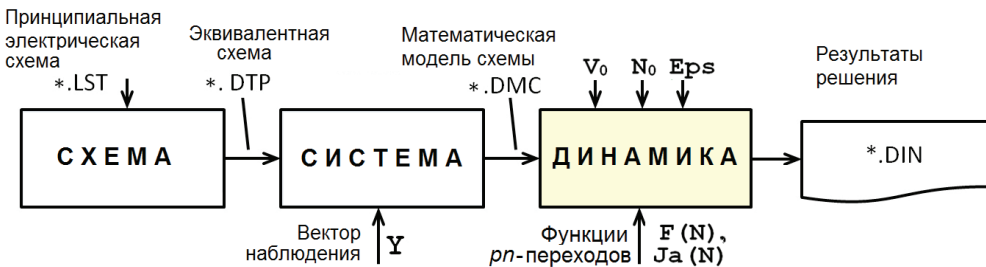


Рис. 5.1. Связи между программами пакета АНАЛИЗ

## 5.1. Интерфейс программы ДИНАМИКА

Интерфейс программы ДИНАМИКА (см. рис. 5.2) по построению во многом схож с интерфейсом программы СТАТИКА, рассмотренном в предыдущем разделе. Он также содержит четыре панели и два окна для показа многострокового текста. Главной панелью интерфейса также является панель Методы решения ММС для выбора методов численного интегрирования математической модели, представленной в файле с расширением **\*.dmc**. Пользователю предоставляется на выбор пять методов численного интегрирования с различными вариантами настроек:

- явный метод Эйлера;
- неявный метод Эйлера;
- метод трапеций;

- метод Рунге–Кутты (4-й порядок);
- методы системы MATLAB.

Правая верхняя панель Параметры моделей компонентов по виду и содержанию совпадает с такой же панелью в программе СТАТИКА. Ниже ее находится панель Источник воздействия  $E_1(t)$  для выбора одного из пяти типов входного периодического сигнала (колебания) и ввода его параметров.

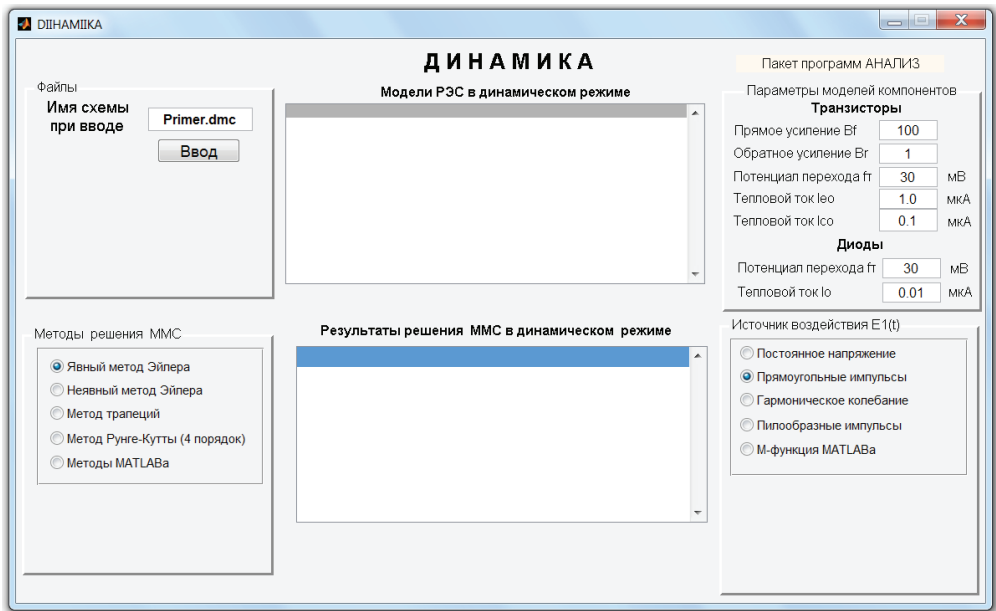


Рис. 5.2. Начальный вид интерфейса программы ДИНАМИКА

После ввода выбранного файла и показа в верхнем окне математической модели схемы также возможна коррекция текста в этом окне с помощью однострочного редактора и кнопки ОК (см. рис. 5.3). На панели Файлы появляется кнопка Формирование ММС, становятся видимыми графические инструменты ввода данных: временного диапазона и параметров входного сигнала. Эти данные, а также все другие настройки: метод интегрирования, тип входного сигнала, параметры транзисторов и диодов, должны быть обязательно определены перед нажатием на кнопку Формирование ММС. Эта кнопка запускает процесс съема данных и обработки модели схемы и далее процедуру формирования объекта **DMC** электронной схемы в динамическом режиме с большим набором свойств.

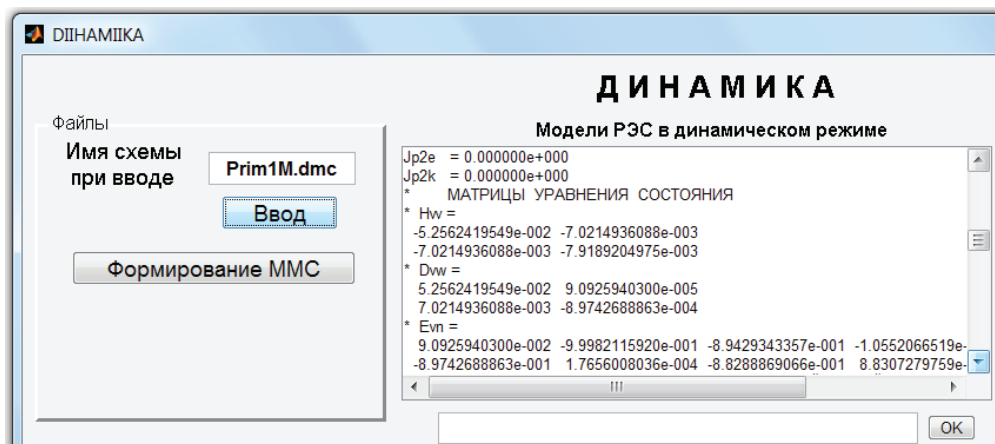


Рис. 5.3. Результат ввода математической модели схемы в динамическом режиме

Объект **dMMC** имеет следующие поля:

- 't' — временные параметры интегрирования [tn, dt, tk];
- 'DMC' — матрицы математической модели [Hvv, Dvw, Evn; . . . , Eyn];
- 'V0' — вектор начального состояния;
- 'N0' — вектор начального приближения;
- 'W0' — вектор независимых источников схемы (питания);
- 'WidW' — название типа входного сигнала;
- 'ParW' — массив параметров входного сигнала;
- 'Osh' — допустимая ошибка решения итерационных процедур (0,0001);
- 'NazwY' — массив названий элементов выходного вектора;
- 'Y0' — массив результатов расчета выходного вектора;
- 'Integr' — название выбранного метода интегрирования;
- 'Solver' — название выбранного решателя системы MATLAB;
- 'Result' — признак успешности выполненных расчетов (итераций);
- 'TResh' — время решения математической модели схемы;
- 'Iter' — число итераций на всех временных шагах;
- 'Schema' — название схемы (файла);
- 'Regim' — режим решения математической модели схемы;
- 'hLst' — указатель на нижнее окно для вывода результатов решения.

Этот объект как структура системы MATLAB появляется в его рабочем пространстве и все его свойства (поля структуры) могут быть просмотрены и использованы как для контроля, так и для корректировки процесса решения задачи динамического анализа. Например, в нижнем окне интерфейса приводится массив собственных чисел матрицы состояния **Hvv** и число ее обусловленности (рис. 5.4). По собственным числам можно вычислить постоянные времени схемы и скорректировать длительность временного анализа (величину **tk**), а по числу обусловленности определить уровень жесткости системы ОДУ и принять решение о методе интегрирования и величине шага приращения.

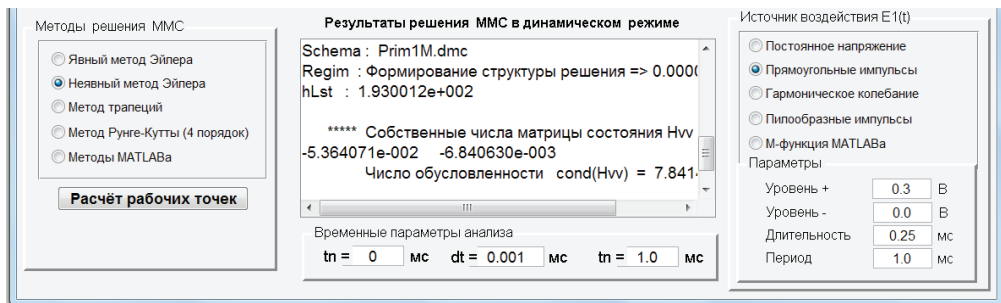


Рис. 5.4. Вывод свойств объекта **dmmc** и обобщенных характеристик модели схемы

На панели Методы решения ММС становится видимой следующая кнопка — Расчет рабочих точек. Нажатие на эту кнопку запускает расчет по постоянному току анализируемой схемы, т. е. вызывает процедуру статического анализа, схожую с подобной процедурой в программе СТАТИКА. В результате расчета в нижнем окне появляются числовые данные о напряжениях и токах на *p-n*-переходах транзисторов и диодов (см. рис. 5.5), которые можно сравнить с одноименными величинами из программы СТАТИКА. Для одинаковой электронной схемы, анализируемой в двух режимах работы, рабочие точки должны совпадать, а их числовые данные различаться на величину, сравнимую с заданной ошибкой решения **Eps**.

После правильного расчета рабочих точек следует запустить процесс численного интегрирования математической модели (кнопка Интегрирование ММС) и получить в нижнем окне интерфейса данные о временных зависимостях элементов выходного вектора (см. рис. 5.6). Здесь же выводятся сведения о вычислительных затратах при определении выходного вектора.

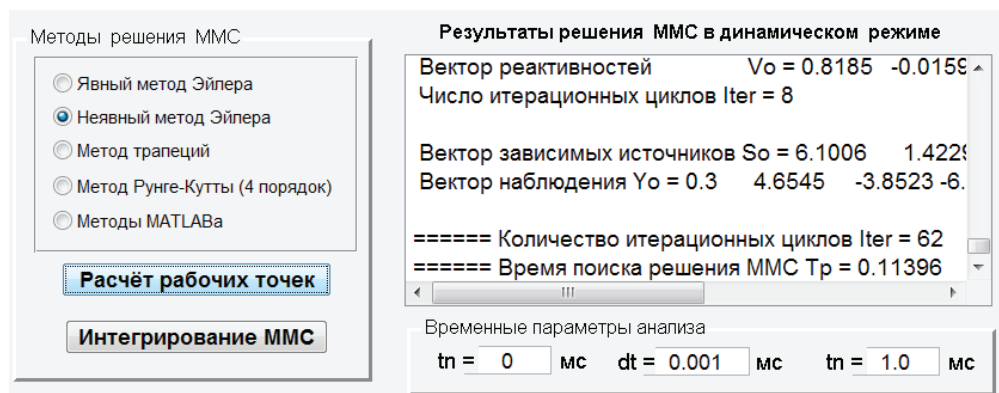


Рис. 5.5. Вывод данных о рабочих точках схемы и процессе их вычислений

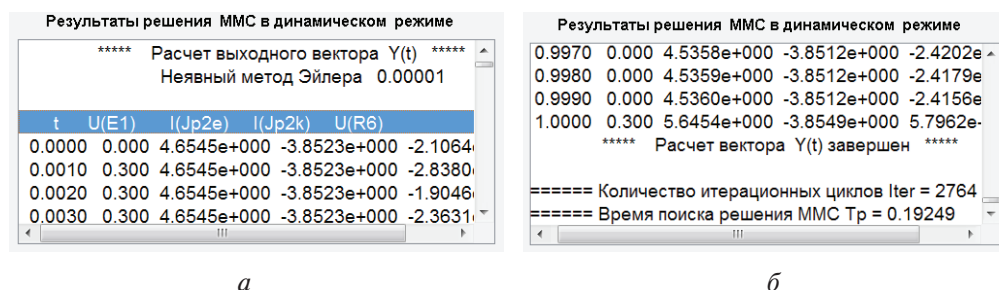


Рис. 5.6. Начало и конец массива элементов выходного вектора (в нижнем окне интерфейса)

Кроме вывода числовых данных, программа ДИНАМИКА строит совместный график рассчитанных зависимостей в отдельном окне (см. рис. 5.7), который может быть вставлен в отчет о работе по команде **Edit/Copy figure** в командной строке этого окна.



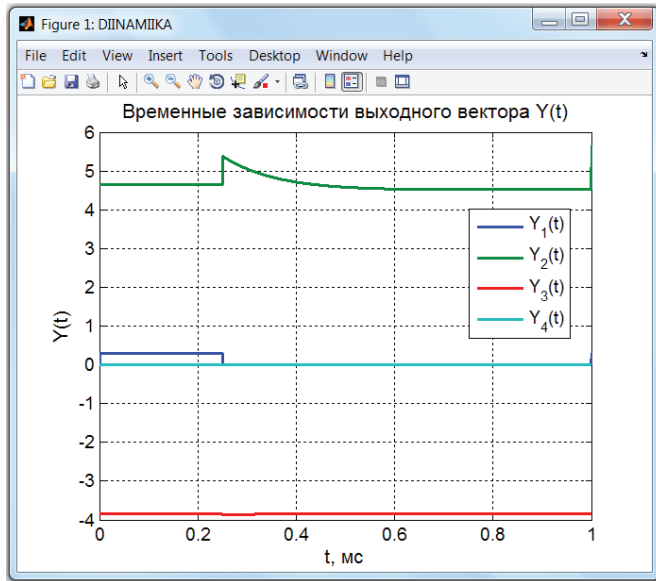


Рис. 5.7. Графики временных зависимостей элементов выходного вектора

### Пример 5.1. Входная информация для программы ДИНАМИКА (DMC-файл)

В исходной схеме (см. рис. 1.1) имеется два транзистора и четыре реактивных элемента. В список габаритных чисел также входят два независимых источника напряжения и 9 сопротивлений. Параметры элементов вводятся в радиотехническом масштабе: вольт, миллиампер, килоом, микрофарада, генри. Текущее время моделирования представляется в миллисекундах.

Ниже представлен текст **DMC**-файла в виде свернутой математической модели.

#### \* ГАБАРИТНЫЕ ЧИСЛА СХЕМЫ USILDN

BU	BE	BC	BR	BH	BS	BG	BL	BI	BJ	ND	NT	BY
0	2	3	6	0	0	3	1	0	4	0	2	4

#### \* ОБОЗНАЧЕНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ

E1 = 0	R9 = 2
E2 = 12	R1 = 0.006667
C1 = 0.1	R2 = 0.06667
C2 = 0.5	R8 = 0.9709
C3 = 10	L1 = 0.05
Rb1 = 0.3	Jp1 = 0
R3 = 12.5	Jp2 = 0

$R5 = 1.05$                        $Jp3 = 0$   
 $Rb2 = 0.3$                        $Jp4 = 0$   
 $R7 = 10.5$

\* СВЕРНУТАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМЫ USILDN

\* МАТРИЦЫ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

\*  $H_{vv} =$

-0.7333337	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	2.0
0.0	0.0	-0.0970874	0.0
0.0	-20.0	0.0	-250.0

\*  $D_{vw} =$

0.7333337	-0.0666667
0.0	0.0
0.0	0.0
0.0	20.0

\*  $E_{vn} =$

10.0	-10.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	-2.0
0.0	0.0	0.1	0.0
0.0	0.0	0.0	40.0

\* МАТРИЦЫ УРАВНЕНИЯ АРГУМЕНТОВ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ

\*  $H_{nv} =$

1.0	0.0	0.0	0.0
1.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	-1.0	0.0
0.0	1.0	0.0	2.0

\*  $D_{nw} =$

\*  $E_{nn} =$

1.0	0.0	1.35	-0.3	0.0	0.0
1.0	1.0	0.3	-12.8	12.5	12.5
0.0	-1.0	0.0	12.5	-12.8	-12.8
0.0	-1.0	0.0	12.5	-12.8	-14.8

\* МАТРИЦЫ УРАВНЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЯ

\*  $H_{yv} =$       \*  $D_{yw} =$       \*  $E_{yn} =$

0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	-2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0

$V0 =$     0    0    0    0

$N0 =$     0    0    0    0

$EPS =$     0.0001

При выполнении самостоятельной работы с программой ДИНАМИКА следует найти область сходимости для метода итераций с постоянной матрицей Якоби, задав  $N_{var} = 12-15$  и определив номер вариации и значение напряжения питания, при котором произошло прерывание расчета. Прodelать это же исследование области и скорости сходимости для метода Бройдена при значениях коэффициента  $Beta = 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4$ .

## 5.2. Указания к оформлению отчета

---

1. Исходная ПЭСх.
2. Содержание текстового файла со списочной моделью ПЭСх.
3. Содержание текстового файла со списочной моделью ПЭСх, представленной двухполюсниками (развернутая схема).
4. Чертеж этой развернутой схемы, выполненный по нормам ЕСКД.
5. Матрицы и векторы математической модели электронной схемы в динамическом режиме (свернутая форма модели), состав объекта **dMMC**.
6. Текстовый файл с содержанием результатов анализа схемы по постоянному току в начальный момент времени (расчет рабочих точек).
7. Графики временных зависимостей элементов выходного вектора.
8. Выводы и рекомендации по самостоятельной работе.

## Контрольные вопросы и задания

---

1. Поясните по блок-схеме работу программы ДИНАМИКА.
2. С какой целью в программе ДИНАМИКА создан объект **dMMC**?
3. Назовите типовые случаи отказа от расчета рабочих точек.
4. Сравните по точности и устойчивости четыре метода численного интегрирования, используемые в программе (кроме методов MATLAB).
5. Каким образом в программе ДИНАМИКА задается временная зависимость внешнего воздействия **E(t)**?

6. Что нужно сделать в программе при изменении напряжения питания схемы?
7. Каков физический смысл собственных чисел матрицы состояния  $\mathbf{H}\mathbf{v}\mathbf{v}$ ?
8. Как определить шаг интегрирования и конец интервала наблюдения?

## 6. Анализ дискретных моделей электронных схем

Выполнение двенадцатого индивидуального задания по самостоятельной работе (см. п. 1.1) основано на замене дифференциальной модели переходных процессов на алгебраическую модель резистивного эквивалента схемы. Современные программы анализа временных зависимостей в электронной схеме часто используют подобный вариант математической модели схемы, в которой каждый конденсатор и катушка индуктивности представлены резистивной схемой замещения. Вид схем замещения полностью определяется выбранным численным методом интегрирования. Такая резистивная схема цепи называется *дискретной моделью схемы* (ДМС), что подчеркивает дискретность изменения электрических параметров модели при переходе от одного временного шага к другому (рис. 6.1). Цепь как бы «замораживается» на каждом временном шаге в виде эквивалентной схемы, состоящей из резистивностей, зависимых и независимых источников. Все параметры этих элементов на временном шаге считаются неизменными, эквивалентная схема становится линейной, а ее математическая модель — системой линейных алгебраических уравнений. Поэтому расчет токов и напряжений в резистивной дискретной модели может проводиться любым эффективным методом (узловых потенциалов, контурных токов, переменных состояния и т. п.), применяемым для анализа линейных цепей.

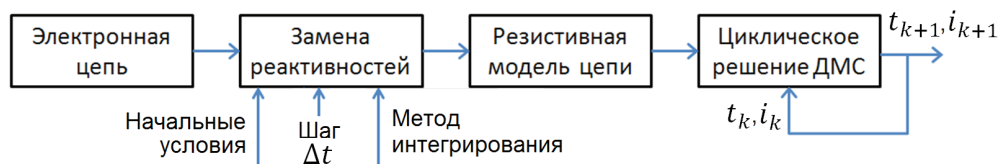


Рис. 6.1. Порядок получения и решения дискретной модели схемы

Например, дискретная модель емкости для неявного метода Эйлера может быть получена следующим образом. Расчетная схема неяв-

ного метода Эйлера для решения дифференциального уравнения напряжения на емкости имеет вид

$$u_{k+1} = u_k + f(u_{k+1}, t_{k+1}) \Delta t = u_k + u'_{k+1} \Delta t. \quad (6.1)$$

Поскольку  $u'_{k+1} = \frac{1}{C} i_{k+1}$ , то из уравнения (6.1) получим выражение для тока емкости на следующем шаге:

$$i_{k+1} = C u_{k+1} / \Delta t - C u_k / \Delta t. \quad (6.2)$$

Этому соотношению соответствует схема замещения с напряжением между узлами  $u_{k+1}$  и током между узлами  $i_{k+1}$  (рис. 6.2). При постоянном шаге  $\Delta t$  и неизменной емкости  $C$  модельное сопротивление  $R$  на схеме также постоянно, а источник тока  $J_k$  зависит от напряжения на емкости  $u_k$  с предыдущего шага.

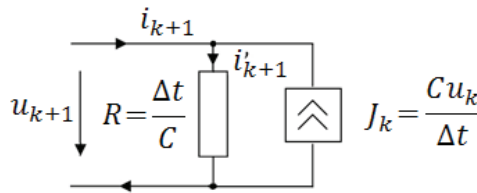


Рис. 6.2. Дискретная модель емкости для неявного метода Эйлера

Переход от непрерывной модели индуктивности к ее дискретной резистивной модели приводит к рекуррентному соотношению

$$i_{k+1} = u_{k+1} \Delta t / L + i_k. \quad (6.3)$$

Резистивная схема замещения индуктивности представлена на рис. 6.3.

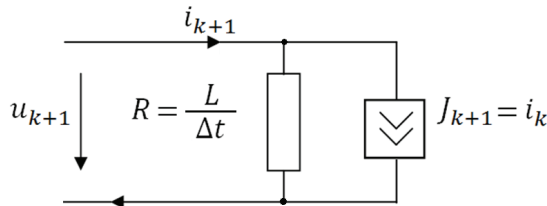


Рис. 6.3. Дискретная модель индуктивности для неявного метода Эйлера

Замена всех реактивностей, в том числе индуктивно связанных катушек (трансформаторов), выполняется для одного шага интегрирования, который в ходе расчетов не изменяется.

## 6.1. Интерфейс программы ДИСКРЕТ

Интерфейс программы ДИСКРЕТ (рис. 6.4) по построению во многом схож с интерфейсом программы ДИНАМИКА, рассмотренным в предыдущем разделе. Он также содержит два окна для показа многострокового текста и по два места слева и два места справа для размещения панелей управления и задания параметров схемы и условий моделирования.

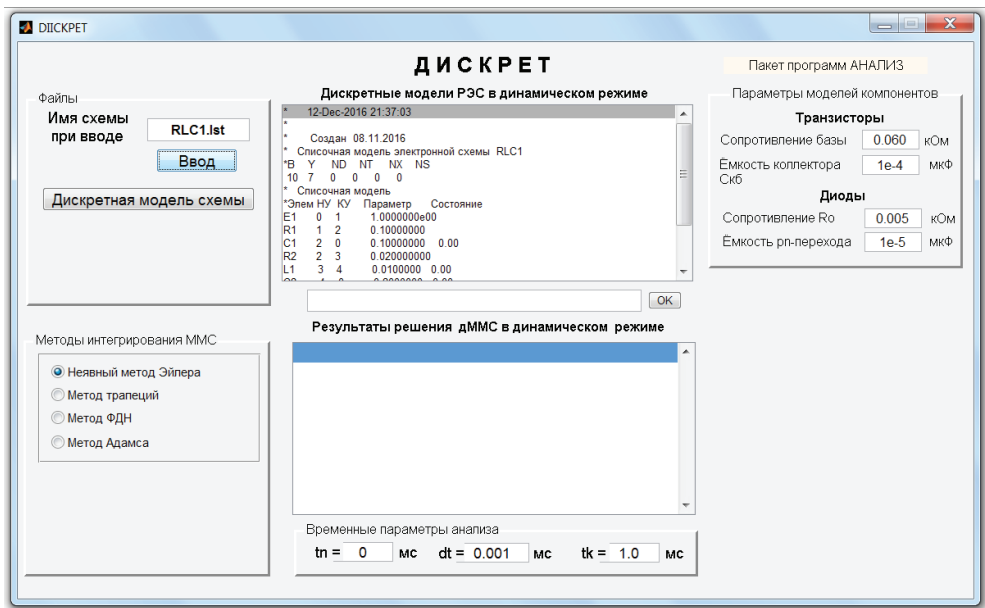


Рис. 6.4. Интерфейс программы ДИСКРЕТ с выбранным неявным методом Эйлера

Левая верхняя панель **Файлы** содержит кнопки для ввода и вывода текстовых файлов с входной информацией о схеме и выходных файлов с результатами моделирования. Кнопка **Дискретная модель схемы** служит для запуска процедуры замены реактивностей схемы, списочная модель которой показана в верхнем окне интерфейса, на комби-

нации сопротивлений и зависимых источников тока. Перед нажатием на эту кнопку панель **Временные параметры анализа** должна обязательно содержать значение заданного шага моделирования  $\Delta t$ .

Главной панелью интерфейса, как и ранее, является панель **Методы интегрирования ММС** для выбора одного из четырех методов численного интегрирования математической модели:

— неявный метод Эйлера

$$u_{k+1} = u_k + f(u_{k+1}, t_{k+1}) \Delta t; \quad (6.4)$$

— метод трапеций

$$u_{k+1} = u_k + 1/2(f(u_{k+1}, t_{k+1}) + f(u_k, t_k)) \Delta t; \quad (6.5)$$

— метод ФДН

$$u_{k+1} = 4/3u_k - 1/3u_{k-1} + 2/3f(u_{k+1}, t_{k+1}) \Delta t; \quad (6.6)$$

— метод Адамса

$$u_{k+1} = 4/5u_k + 1/5u_{k-1} + 2/5(f(u_{k+1}, t_{k+1}) - 2f(u_k, t_k)) \Delta t. \quad (6.7)$$

Выбрав метод интегрирования и задав шаг дискретизации  $\Delta t$  дифференциальной модели, нажимают кнопку **Дискретная модель схемы**. Если исходная схема состоит только из линейных элементов, то на экране появляется модальное окно для выбора вида схемы (рис. 6.5).

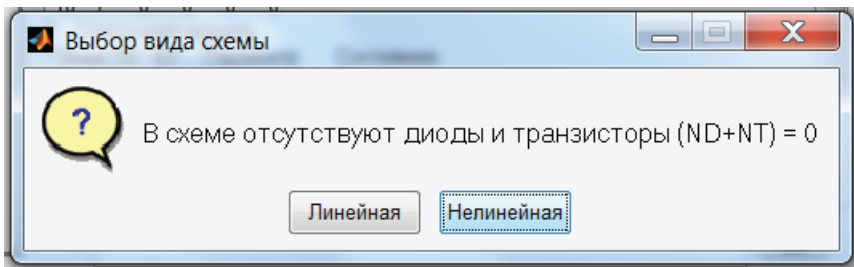


Рис. 6.5. Всплывающее модальное окно для выбора вида схемы

После выбора вида исходной схемы это окно закрывается, но появляется новое, в котором следует определиться с наличием в схеме индуктивных связей (см. рис. 6.6). Это окно может отсутствовать, если в схеме одна или совсем нет индуктивностей.



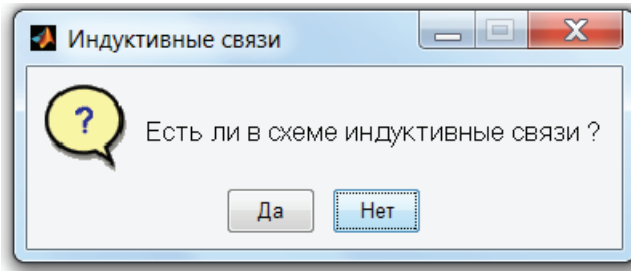


Рис. 6.6. Всплывающее модальное окно для задания сведений об индуктивных связях

Нажатие на кнопку **Дискретная модель схемы** завершается вставкой в верхнее окно дискретной списочной модели исходной схемы и появлением на панели **Файлы** инструментальной кнопки для ее вывода в текстовый файл.

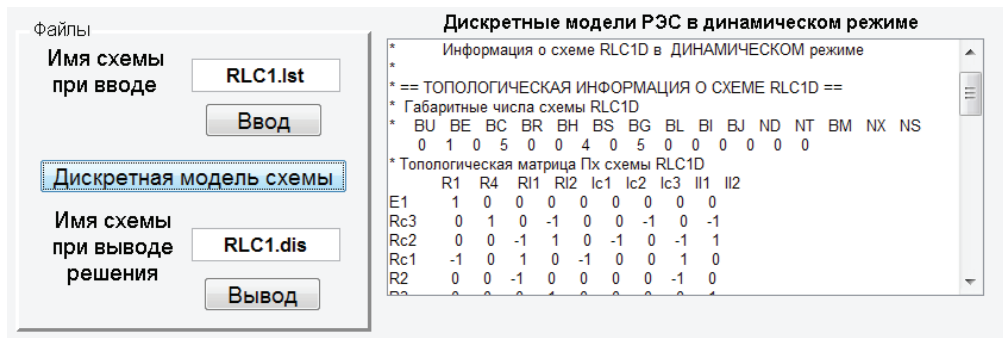


Рис. 6.7. Вид активной части интерфейса программы ДИСКРЕТ после формирования дискретной модели электронной схемы

Дальнейшее выполнение процедуры динамического анализа схемы возможно после записи (кнопка **Вывод**) содержимого верхнего окна в заданный текстовый файл. Расширение имени этого файла (\*.dis) не должно меняться.

По дискретной списочной модели формируется дискретная математическая модель схемы (дММС), представляющая собой строго формализованный набор матриц и функциональных зависимостей, соединенных в систему нелинейных и линейных уравнений. Формирование дММС должно начинаться с задания вектора наблюдения, т.е. с указания напряжений и токов тех элементов дискретной схемы, которые выбраны для анализа исходной схемы. Эти наблюдаемые зависимости

выбираются с помощью панели, появившейся справа внизу окна интерфейса (рис. 6.8). Слева внизу также появляется кнопка **Формирование дММС**, нажатие на которую приводит к появлению в нижнем окне интерфейса сведений о матрицах и векторах дММС (рис. 6.9).

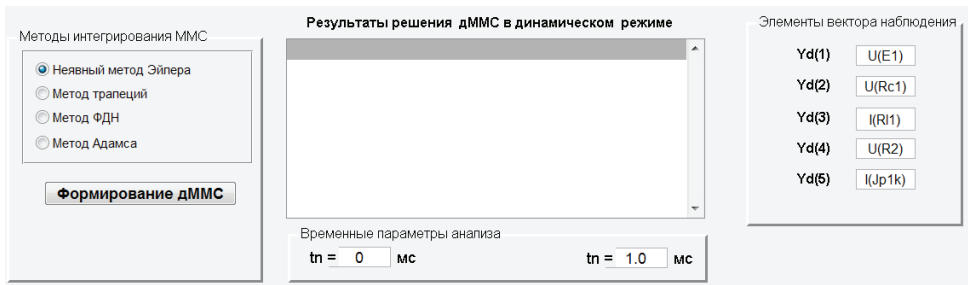


Рис. 6.8. Вид активной части интерфейса программы ДИСКРЕТ перед формированием дискретной математической модели электронной схемы (дММС)

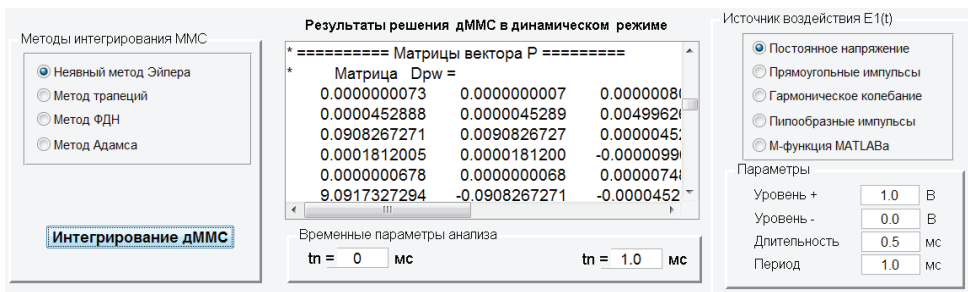


Рис. 6.9. Вид активной части интерфейса программы ДИСКРЕТ после формирования дискретной математической модели электронной схемы (дММС)

Одновременно панель **Элементы вектора наблюдения** заменяется на панель **Источник воздействия  $E(t)$** , на которой можно выбрать один из пяти вариантов входного воздействия. В исходной схеме обычно это независимый источник напряжения  $E1(t)$ .

Вариант источника воздействия под названием **М-функция MATLABa** по умолчанию обращается к *m*-функции с именем **Wozd**:

```
function W = Wozd(t)
% W = Wozd(t)
% W - вектор независимых источников [В, мА]
% t - текущее время, мс

W = 0.25*(1+0.8*cos(2*pi*t*3))*sin(2*pi*t*44.3);
```

С помощью этой функции генерируются отсчеты амплитудно-модулированного колебания с коэффициентом модуляции 0,8 и соотношением несущей и модулирующей частот 44,3/3. Применение другого вида воздействия состоит в замене последней строки на индивидуальное выражение, определяющее вектор  $\mathbf{W}$  в зависимости от переменной времени  $t$ .

Выбором функциональной зависимости внешнего воздействия заканчивается подготовка к расчету искомых временных характеристик — элементов выходного вектора  $Y(t)$ . Поэтому копия нижней части интерфейса программы ДИСКРЕТ, изображенная на рис. 6.9, является образом рабочей части интерфейса для проведения расчетных операций. Для этого еще раз просматриваются граничные временные параметры  $t_n$  и  $t_k$  и нажимается кнопка **Интегрирование дММС**. Результат расчета дММС — числовые массивы — отображаются в новом окне в виде графиков зависимостей выходного вектора  $Y(t)$ : на рис. 6.10 как реакция на «единичную ступеньку», на рис. 6.11 — на единичный видеоимпульс.

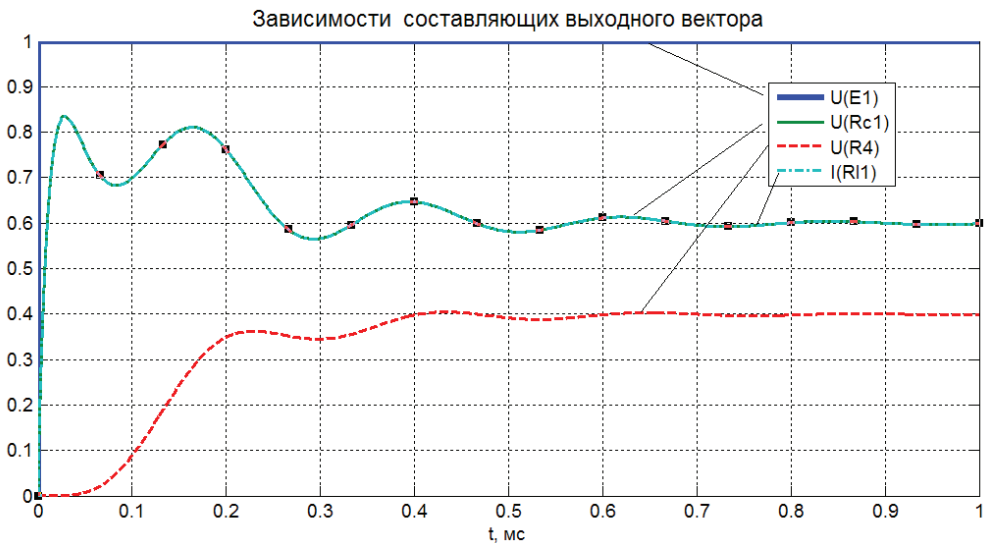


Рис. 6.10. Зависимости выходного вектора при воздействии «единичная ступенька»

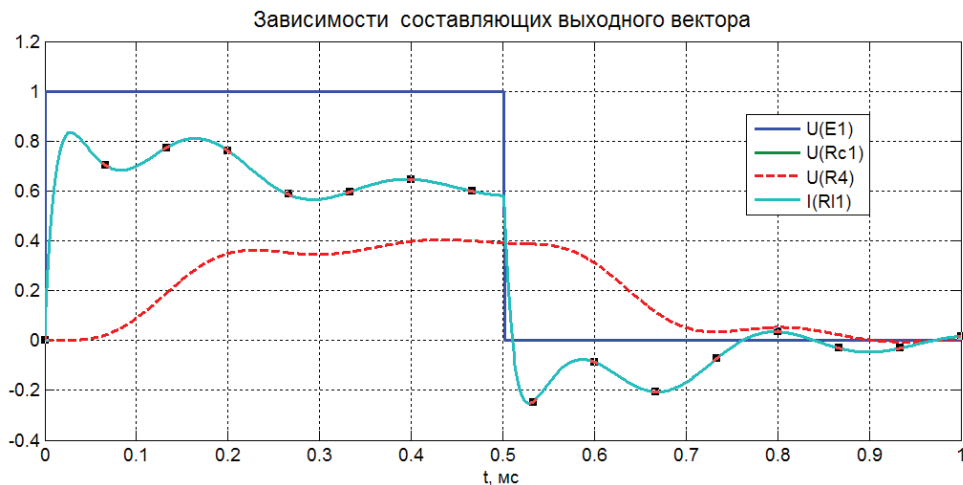


Рис. 6.11. Зависимости выходного вектора при воздействии «единичный видеоимпульс»

## 6.2. Выполнение индивидуального задания

Предположим, индивидуальное задание состоит в сравнении погрешностей моделирования временных зависимостей  $u_{R4}(t)$ ,  $u_{C1}(t)$  и  $i_{L1}(t)$  от выбора метода интегрирования. Определение указанных зависимостей должно быть выполнено для линейной схемы, показанной на рис. 6.12. Входное воздействие — «единичная ступенька», т.е.  $E(t) = 1(t)$ .

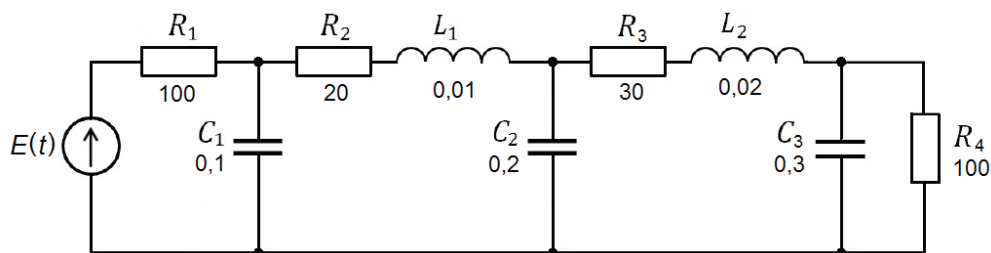


Рис. 6.12. Исходная схема индивидуального задания с пятью реактивностями

**1. Формирование дискретной модели исходной схемы.** Сначала в исходной схеме все реактивности заменяются идеальными резистивны-

ми элементами (сопротивлениями) и параллельно включенными зависимыми источниками тока. Схемы замещения показаны на рис. 6.2 (емкости) и рис. 6.3 (индуктивности). Параметры этих элементов зависят от метода интегрирования и могут быть определены по формулам (6.4)–(6.7). Конфигурация полученной дискретной эквивалентной схемы представлена на рис. 6.13. Она содержит один независимый источник напряжения (входное воздействие), девять сопротивлений, из которых пять имеют параметры, зависящие от метода интегрирования, и также пять зависимых источников тока, моделирующих токи соответствующих реактивностей.

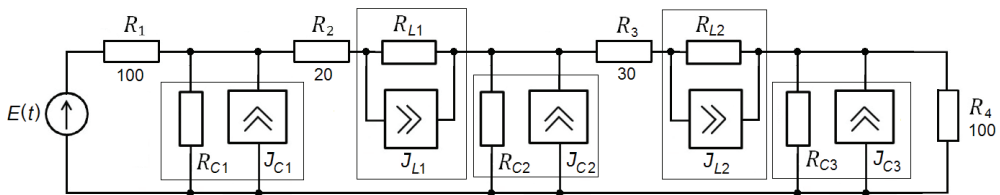


Рис. 6.13. Конфигурация дискретной модели исходной схемы

Далее, в зависимости от метода интегрирования, рассчитываются параметры сопротивлений:

— неявный метод Эйлера:

$$R_C = \Delta t / C; R_L = L / \Delta t; \quad (6.8)$$

— метод трапеций:

$$R_C = \Delta t / (2C); R_L = 2L / \Delta t; \quad (6.9)$$

— метод ФДН:

$$R_C = 2\Delta t / (3C); R_L = 3L / (2\Delta t); \quad (6.10)$$

— метод Адамса:

$$R_C = 2\Delta t / (5C); R_L = 5L / (2\Delta t). \quad (6.11)$$

Формулы для определения параметров зависимых источников тока приведены в [1, 2]. Списочные модели исходной схемы **RLC1** и ее дискретной модели **RLC1D** для неявного метода интегрирования представлены ниже.

```

*
*          Создан 08.11.2016
*   Списочная модель схемы RLC1
*В      Y      ND      NT      NX      NS
 10     7       0       0       0       0
*   Списочная модель
*Элем  НУ  КУ  Параметр  Состояние
E1      0   1   1.0000000
R1      1   2   0.1000000
C1      2   0   0.1000000   0.00
R2      2   3   0.0200000
L1      3   4   0.0100000   0.00
C2      4   0   0.2000000   0.00
R3      4   5   0.0300000
L2      5   6   0.0200000   0.00
C3      6   0   0.3000000   0.00
R4      6   0   0.1000000

* === ФОРМУЛЯР СХЕМЫ RLC1D ===
*   Габаритные числа схемы RLC1D
*      В      Y      ND      NT      NX      NS
      15     7       0       0       0       0
*   Списочная модель схемы RLC1D
*   Элем  НУ  КУ  Параметр
E1      0   1   1.0000
Rc3     6   0   0.0033
Rc2     4   0   0.0050
Rc1     2   0   0.0100
R2      2   3   0.0200
R3      4   5   0.0300
R1      1   2   0.1000
R4      6   0   0.1000
R11     3   4   10.0000
R12     5   6   20.0000
Ic1     0   2   0.0000
Ic2     0   4   0.0000
Ic3     0   6   0.0000
I11     3   4   0.0000
I12     5   6   0.0000

```

**2. Формирование математической модели дискретной схемы** проводится с использованием метода переменных состояния [2]. В данном случае (исходная схема — линейная) матрицы и векторы зависимых источников, моделирующие *pn*-переходы, отсутствуют. Математическая модель вырождается в матрично-векторное произведение:

— расчет напряжений и токов сопротивлений

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{D}_{pw} \mathbf{W}_k; \quad (6.12)$$

— расчет элементов выходного вектора

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{D}_{yw} \mathbf{W}_k, \quad (6.13)$$

где матрицы  $\mathbf{D}_{pw}$  и  $\mathbf{D}_{yw}$  имеют вид:

```

* ===== Матрицы вектора P =====
*   Матрица  Dpw =
0.0000000073   0.0000000007   0.0000008044   0.0032249751   0.0000008021   0.0032193416
0.0000452888   0.0000045289   0.0049962621   0.0000008044   0.0049817697  -0.0049879757
0.0908267271   0.0090826727   0.0000045289   0.0000000007  -0.0090600238  -0.0000045214
0.0001812005   0.0000181200  -0.0000099635  -0.0000000016   0.0199320523   0.0000099470
0.0000000678   0.0000000068   0.0000074820  -0.0000048290   0.0000074603   0.0299427749
9.0917327294  -0.0908267271  -0.0000452888  -0.0000000073   0.0906002378   0.0000452137
0.0000000729   0.0000000073   0.0000080443   0.0322497508   0.0000080210   0.0321934163

```

```

0.0090600238  0.0009060024  -0.0004981770  -0.0000000802  -0.0033973846  0.0004973507
0.0000022607  0.0000002261  0.0002493988  -0.0001609671  0.0002486754  -0.0019075046

```

```

* ===== Матрицы выходного вектора =====

```

```

*           Матрица      Дуw =

```

```

1.0000000000  0.0000000000  0.0000000000  0.0000000000  0.0000000000  0.0000000000
0.0908267271  0.0090826727  0.0000045289  0.0000000007  -0.0090600238  -0.0000045214
0.0908267271  0.0090826727  0.0000045289  0.0000000007  -0.0090600238  -0.0000045214
0.0000000073  0.0000000007  0.000008044  0.0032249751  0.000008021  0.0032193416

```

**3. Пошаговый расчет математической модели дискретной схемы** выполняется после определения на каждом временном шаге значений входного воздействия  $E(t_k)$  и зависимых источников тока  $J_k$ . В данном случае формируется полный вектор из шести источников

$$\mathbf{W}_k = [E(t_k) \ J_{C1,k} \ J_{C2,k} \ J_{C3,k} \ J_{L1,k} \ J_{L2,k}]^T. \quad (6.14)$$

Например, значения зависимых источников тока при неявном методе Эйлера находятся по формулам:

$$J_{C,k} = Cu_{k-1} / \Delta t; \ J_{L,k} = i_{k-1}, \quad (6.15)$$

где  $u_{k-1}$  и  $i_{k-1}$  — соответственно напряжение на емкости и ток индуктивности, взятые с предыдущего шага. Эти значения определяются по известным элементам вектора  $\mathbf{P}_{k-1}$ . Таким образом замыкается простой цикл по вычислению элементов выходного вектора  $\mathbf{Y}_k$ .

На рис. 6.14 приведена полная структура данных, необходимых для решения задач анализа в программе ДИСКРЕТ. Она представлена в рабочем пространстве системы MATLAB переменной dMMS. Содержимое структуры может быть представлено в отдельном окне, копия которого показана на упомянутом рисунке.

**4. Автоматическое построение графиков временных зависимостей** выходного вектора  $\mathbf{Y}(t)$  (предпоследнее поле структуры dMMS на рис. 6.14) проводится для временного диапазона с границами (tn, tk). Шаг расчета был задан ранее, здесь он равен  $\Delta t = 0,001$  мс. На рис. 6.15 приведены четыре графика, три из которых представляют собой рассчитанную реакцию выбранных напряжений и токов исходной схемы на «единичную ступеньку». Две зависимости —  $u_{RC1}(t) = u_{C1}(t)$ ,  $u_{RL1}(t) \neq u_{L1}(t)$  — численно совпадают, хотя вторая должна отличаться от первой, поскольку она представляет ток индуктивности  $L1$  через ток сопротивления  $R_{L1}$ .

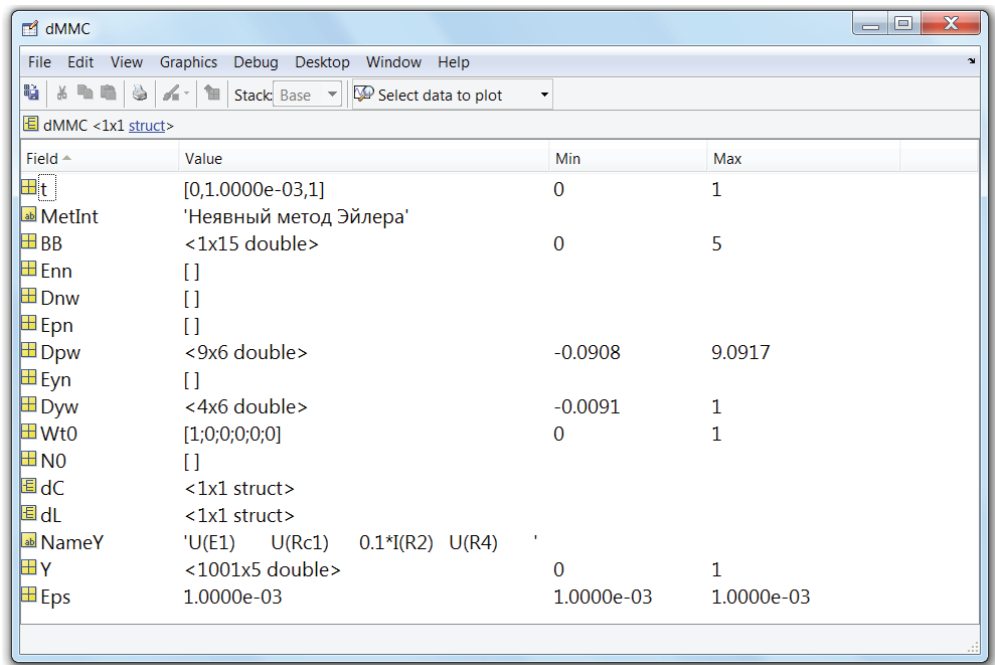


Рис. 6.14. Структура объекта dMMC в программе ДИСКРЕТ

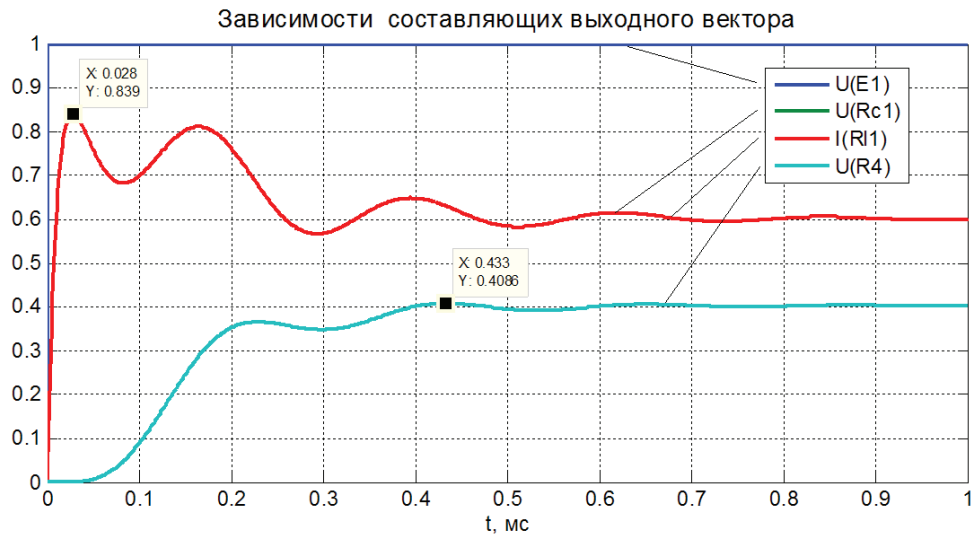


Рис. 6.15. Графики зависимостей напряжений и токов, рассчитанные в программе ДИСКРЕТ методом трапеций



Чтобы разрешить это несоответствие, следует обратиться к программе Micro-Cap, выполнить моделирование исходной схемы (рис. 6.16) и сравнить результаты моделирования тока индуктивности  $L1$  двух программ.

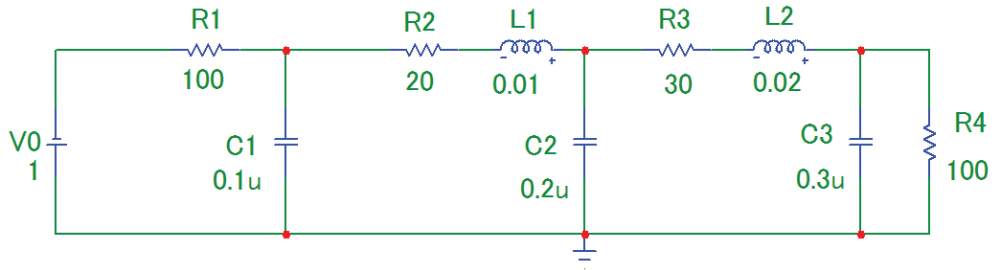


Рис. 6.16. Представление исходной ПЭСх в графическом редакторе программы Micro-Cap

Сравнение двух графиков зависимостей тока индуктивности  $i_{L1}(t)$  (см. рис. 6.15 и рис. 6.17) демонстрирует их принципиальное различие, необъяснимое вычислительными погрешностями. Дело в том, что ток модельного сопротивления  $R_{L1}$  представляет собой только часть тока индуктивности  $L1$ . Вторая составляющая этого тока есть ток зависимого источника  $J_{L1}$ . В нашем случае это несоответствие разрешается достаточно просто: построение графика  $i_{L1}(t)$  заменяется построением графика  $i_{R2}(t)$ , поскольку через элементы  $R_2$  и  $L_1$  на исходной схеме протекают одинаковые токи (см. рис. 6.18). При сравнении зависимостей обоих токов необходимо учитывать масштабные коэффициенты.

**5. Итоговое сравнение погрешностей моделирования** дискретной модели исходной схемы с использованием различных методов интегрирования представлено в табл. 6.1. Поскольку первые две цифры во всех данных совпадают, то относительная погрешность 1 % (или 0,01) достигнута. Различия в третьей значащей цифре означают невыполнение стандартных требований по точности решения (ошибка больше 0,1 % или 0,001). Сопоставляя рассчитанные данные с результатами моделирования в программе Micro-Cap, можно сделать вывод о близости к ним расчетов, полученных при использовании метода трапеций и неявного метода Эйлера.

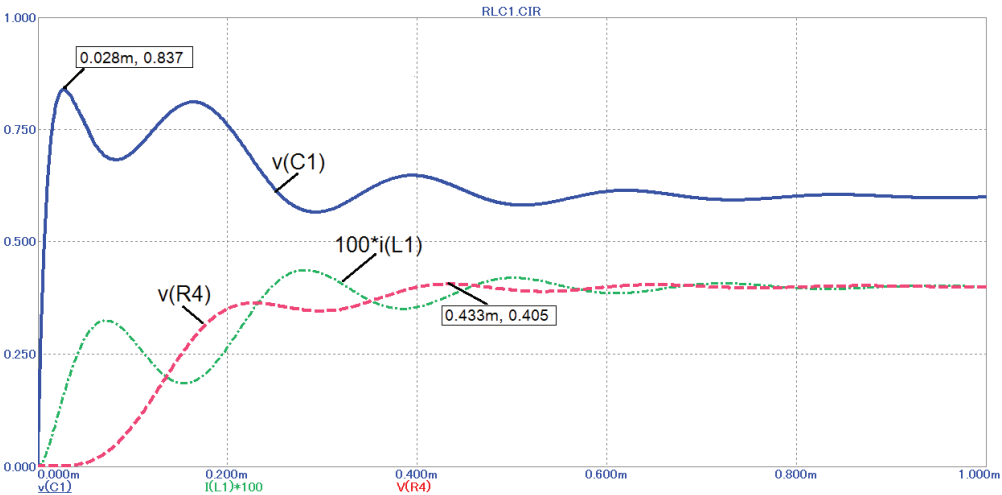


Рис. 6.17. Графики зависимостей напряжений и токов, рассчитанные в программе Micro-Cap

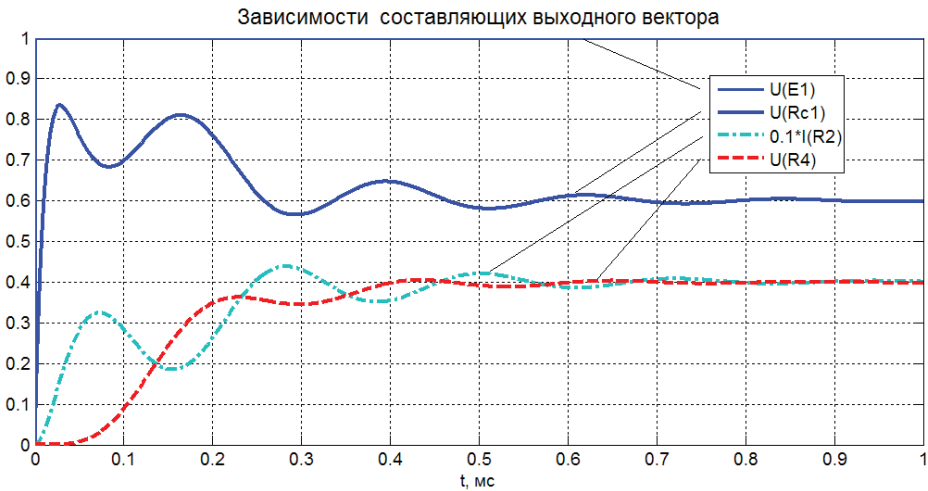


Рис. 6.18. Графики зависимостей напряжений и токов, рассчитанные в программе ДИСКРЕТ неявным методом Эйлера

Таблица 6.1

Сравнение результатов расчета различными методами интегрирования

№	Метод интегрирования	Напряжение $U_{(C1)_{\max}}$	Напряжение $U_{(R4)_{\max}}$
1	Неявный метод Эйлера	0,8347	0,4046
2	Метод трапеций	0,8390	0,4086

Окончание табл. 6.1

№	Метод интегрирования	Напряжение $U$ ( $C1$ ) <sub>max</sub>	Напряжение $U$ ( $R4$ ) <sub>max</sub>
3	ФДН-2	0,8452	0,4059
4	Метод Адамса	0,8444	0,4032
5	Micro-Cap	0,8370	0,4050

### 6.3. Оформление отчета по индивидуальному заданию

1. Исходная ПЭСх.
2. Цель исследования схемы и постановка задачи анализа.
3. Обоснование выбора программы ДИСКРЕТ, выбор методов численного решения, параметров моделей и самого моделирования, в частности, шага интегрирования.
4. Чертеж и содержание текстового файла со списочной моделью ПЭСх.
5. Содержание текстового файла с дискретной списочной моделью ПЭСх, представленной двухполюсниками (развернутой схемы).
6. Чертеж этой развернутой схемы, выполненный по нормам ЕСКД.
7. Матрицы и векторы дискретной линейной математической модели (дММС) с пояснениями их содержания (фрагменты dis-файла).
8. Структура дММС, ее описание с указанием наименований полей и пояснений их содержания.
9. Графические представления временных зависимостей выходного вектора с указанием масштабов. При необходимости на графиках проставляются контрольные точки с числовыми данными.
10. Выводы о результатах решения поставленной задачи и рекомендации о направлениях дальнейших исследований в самостоятельной работе.

## Контрольные вопросы и задания

---

1. Поясните по блок-схеме работу программы ДИСКРЕТ.
2. С какой целью в программе ДИСКРЕТ использован объект **dmms**? Поясните его сходство и различие с одноименным объектом программы ДИНАМИКА.
3. Поясните правило записи элементов выходного вектора при расчете в программе ДИСКРЕТ токов индуктивностей или емкостей исходной схемы.
4. Дайте определение понятия «резистивная модель электронной схемы». Каким образом это понятие связано с дискретизацией процессов в схеме?
5. Почему только емкости и индуктивности эквивалентной схемы заменяются дискретными моделями при формировании резистивной модели схемы?
6. Каким образом выбираются схемы замещения реактивностей? Какие характеристики методов интегрирования при этом выборе учитываются?
7. Каков физический смысл включения в состав дискретных моделей элементов источников тока и напряжения, зависящих от токов и напряжений элементов?
8. Приведите зависимости локальных ошибок интегрирования с помощью резистивных моделей при использовании методов Эйлера, трапеций и ФДН второго порядка.
9. Поясните содержание шагов алгоритма при формировании и при решении дискретной математической модели электронной схемы. Какие составляющие этой модели и при каких условиях остаются неизменными на всем интервале моделирования?
10. На какую величину возрастает порядок системы линейных алгебраических уравнений при введении в эквивалентную схему одной взаимной индуктивной связи?

## 7. Анализ электронных схем в линеаризованном режиме

---

**П**еред выполнением тринадцатого индивидуального задания по самостоятельной работе необходимо изучить методы формирования и решения математических моделей электронных схем в линейном режиме.

В частотной области в качестве математической модели выбираются *схемные функции*, например, коэффициент передачи по напряжению  $K_u(j\omega)$ . Схемные функции находятся при помощи преобразования Лапласа системы линейных дифференциальных уравнений в методе переменных состояния

$$d\mathbf{V}(t)/dt = \mathbf{H}_л \mathbf{V}(t) + \mathbf{D}_л \mathbf{W}(t), \quad (7.1)$$

которое называется *уравнением состояния* линейной схемы. Оно содержит *матрицу состояния*  $\mathbf{H}_л$ , которая полностью определяет собственное поведение линейной схемы, и *матрицу управления*  $\mathbf{D}_л$ , определяющую влияние на схему внешних воздействий. Второе уравнение временной системы (*уравнение наблюдения*)

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{H}_{ул} \mathbf{V}(t) + \mathbf{D}_{ул} \mathbf{W}(t) \quad (7.2)$$

дает возможность определить значения отклика схемы  $\mathbf{Y}(t)$  на воздействие  $\mathbf{W}(t)$ . Четыре матрицы двух уравнений (свернутая форма математической модели линейной схемы) метода переменных состояния определяются с помощью программ СХЕМА и СИСТЕМА и запоминаются в файле с расширением **\*.lmc**. Результаты частотного анализа методом переменных состояния запоминаются в файле с расширением **\*.fun** (см. рис. 7.1).

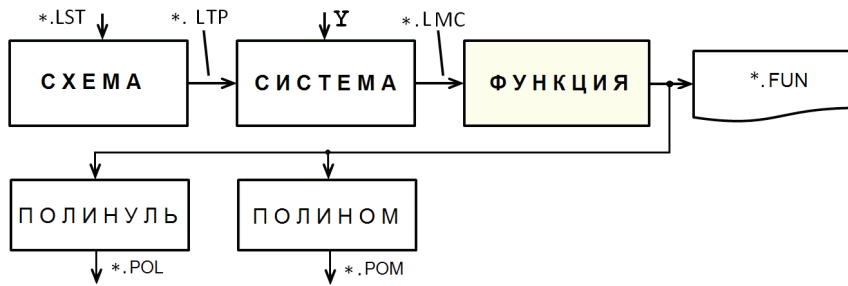


Рис. 7.1. Схема связей между программами при частотном анализе

Перед обращением к программе **ФУНКЦИЯ** студенту необходимо изучить алгоритм Фаддеева-Леверье перевода ММС из временной области к дробно-рациональному виду в частотной области. Он должен знать свойства матрицы состояния и свойства полиномов знаменателя и числителя, уметь сопоставлять свойства полиномов с характеристиками линейной схемы. Для проведения расчетов следует знать определения шага и частоты дискретизации, связи между спектрами аналогового и дискретного сигналов, между верхней граничной частотой и частотой дискретизации. Он должен изучить методы вычисления матричной экспоненты, знать их достоинства и недостатки, а также уметь записать в общем виде дискретную математическую модель линейной схемы.

Получить от преподавателя (или выбрать) пассивную линейную цепь, определить воздействия  $\mathbf{W}(t) = [w_1(t), w_2(t), \dots, w_{bw}(t)]$ , затем подготовить с помощью программы **СХЕМА** входную информацию об электронной схеме. В структуре исходной схемы следует исключить особенности, при описании параметров компонентов выбрать масштаб представления (например, В, кОм, мА, мкФ и Гн) таким, чтобы их численные значения были в среднем как можно близки к единице.

Определить с помощью программы **СИСТЕМА** матрицы математической модели схемы. Вектор наблюдения  $\mathbf{Y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_{by}(t)]$  не должен иметь в своем составе входное воздействие. Количество элементов вектора  $\mathbf{Y}(t)$  следует ограничить тремя. Вычислить по формуле

$$\text{Tau}(i) = -1 / H_{\alpha}(i, i), \quad i = 1 \dots bv, \quad (7.3)$$

все постоянные времени и выбрать среди них минимальную  $f_{\min}$  и максимальную  $f_{\max}$  постоянные времени. Нулевые и бесконечно большие

значения  $Tau(i)$  в расчет не принимать. Задать интервал определения схемных функций по частоте  $[f_{\min}, f_{\max}]$ , шаг по частоте  $df$ . Частота обычно выражается в килогерцах.

## 7.1. Интерфейс программы ФУНКЦИЯ

Интерфейс программы ФУНКЦИЯ (рис. 7.2) по построению во многом схож с интерфейсом программы ДИСКРЕТ, рассмотренным в предыдущем разделе.

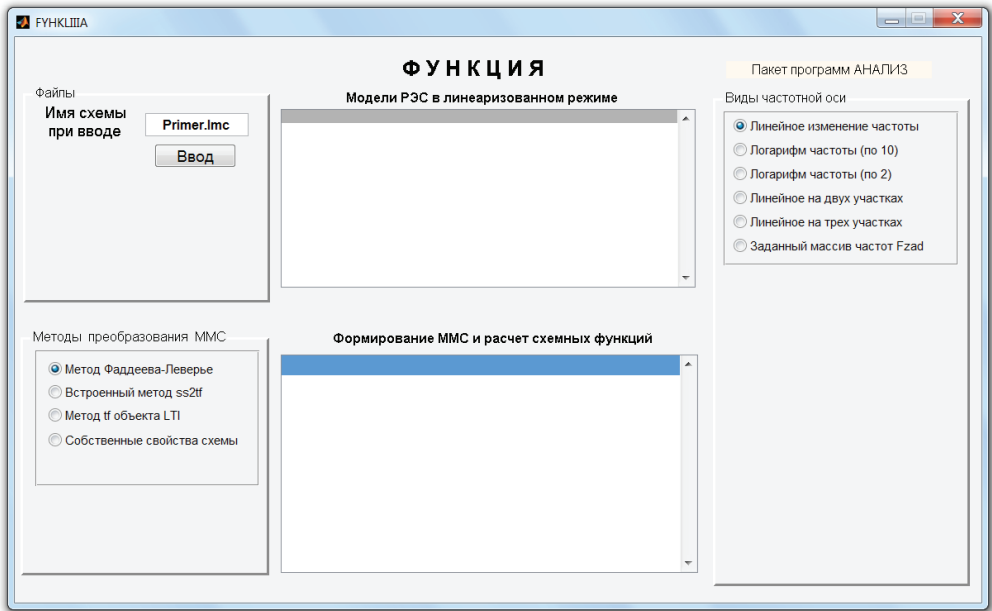


Рис. 7.2. Начальный вид интерфейса программы ФУНКЦИЯ

Он также содержит четыре панели и два окна для показа многострокового текста. Главной панелью интерфейса также является панель Методы преобразования ММС для выбора методов преобразования временной математической модели, представленной в файле с расширением **\*.lmc**. Пользователю предоставляется на выбор четыре метода преобразования временной модели, записанной в фор-

ме матриц уравнений состояния и наблюдения, в частотную модель, записанную в виде отношений полиномов числителя и знаменателя:

- метод Фаддеева-Леверье;
- метод, основанный на встроенной функции **ss2tf**;
- метод ( $m$ -функция) **tf** объекта **LTI**;
- собственные свойства схемы.

Правая верхняя панель **Виды частотной оси** служит для определения вида и параметров частотной оси при построении частотных характеристик схемы:

- линейное изменение частоты;
- логарифмическое изменение частоты, разделенное на декады;
- логарифмическое изменение частоты, разделенное на октавы;
- два участка частотной оси с различными линейными масштабами;
- три участка частотной оси с различными линейными масштабами;
- частотная ось с произвольными отметками частоты, заданными в виде массива.

После ввода выбранного файла (здесь схема **Prim1.lmc**) и показа в верхнем окне математической модели схемы также возможна коррекция текста в этом окне с помощью однострочного редактора и кнопки **ОК** (рис. 7.3). На панели **Файлы** появляется кнопка **Создание LTI-объекта**, становятся видимыми инструменты настройки параметров частотной оси. Эти данные, а также выбор метода преобразования должны быть обязательно определены перед нажатием на кнопку **Создание LTI-объекта**. С ее помощью запускается процесс преобразования ММС и чтения данных частотной оси и далее процедура формирования объекта **1MMC** электронной схемы в линеаризованном режиме с большим набором свойств.

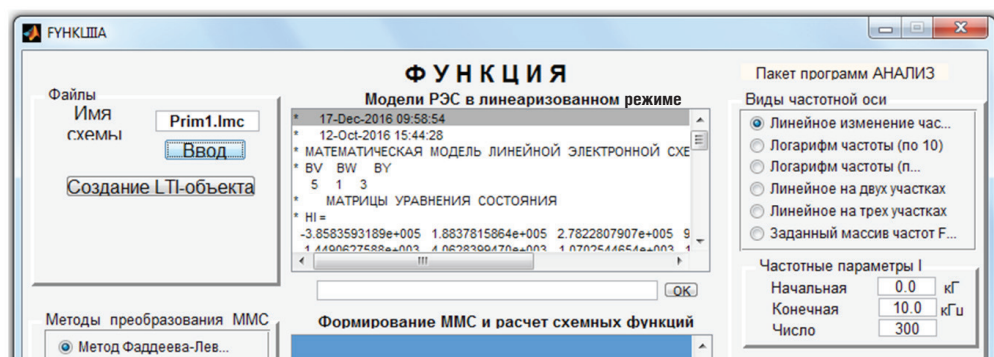


Рис. 7.3. Результат ввода линейной математической модели схемы



Объект **LMMC** имеет следующие поля:

- 'LMC' — матрицы математической модели [Нл, Дл; Нул, Дул];
- 'NameV' — массив имен вектора состояния;
- 'NameW' — массив имен вектора управления;
- 'NameY' — массив имен вектора наблюдения;
- 'Lambda' — коэффициенты полинома знаменателя;
- 'Ty' — матричные коэффициенты полинома числителя;
- 'VidF' — вид частотной оси;
- 'ParF' — базовый шаг по частоте;
- 'ParF1' — первый дополнительный параметр частотного диапазона;
- 'ParF2' — второй дополнительный параметр частотного диапазона;
- 'NazvMet' — название выбранного метода преобразования;
- 'SchFun' — массив значений схемных функций;
- 'f' — массив значений частотных точек;
- 'Schema' — название исследуемой линейной схемы (файла);
- 'LTI' — название LTI-объекта модели схемы;
- 'hLst' — указатель на нижнее окно для вывода результатов решения.

Этот объект как структура системы MATLAB появляется в его рабочем пространстве и все его свойства (поля структуры) могут быть просмотрены и использованы как для контроля, так и для корректировки процесса решения задачи анализа схемных функций. Также свойства объекта **LMMC** отображаются в нижнем окне интерфейса (рис. 7.4).

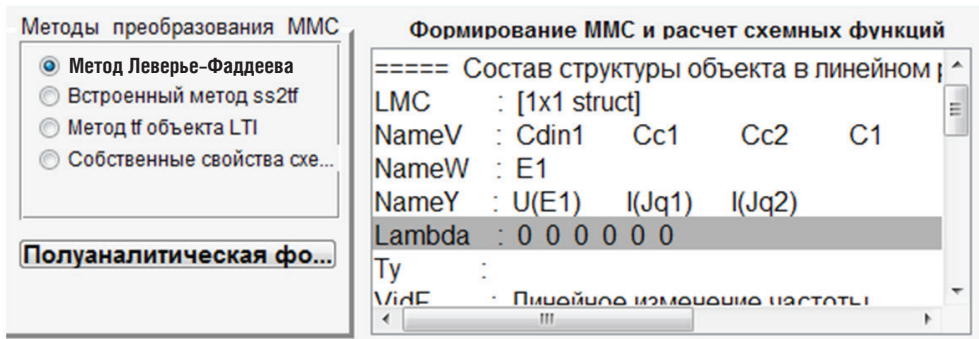


Рис. 7.4. Вывод свойств объекта **LMMC** и обобщенных характеристик модели схемы

Кроме того, там же приводятся собственные числа матрицы состояния, постоянные времени электронной схемы и частоты ее собственных колебаний. Зная частоты собственных колебаний, можно определить границы частотного интервала и принять решение о виде и параметрах частотной оси для правильного представления схемных функций.

На панели Методы преобразования ММС становится видимой следующая кнопка — Полуаналитическая форма ММС. Нажатие на эту кнопку запускает процесс преобразования временной формы ММС в частотную форму, в данном случае процедуру Леверье—Фаддеева. В результате пошагового перехода от одной формы ММС к другой в нижнем окне появляются числовые значения коэффициентов полиномов числителя и знаменателя (рис. 7.5). В конце выводимого списка находятся результаты названного преобразования: скалярные коэффициенты полинома знаменателя **Lambda** и матричные коэффициенты полинома числителя **T**.

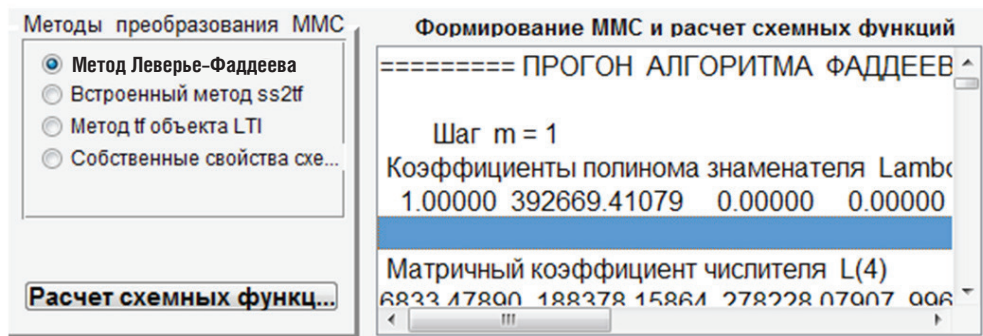
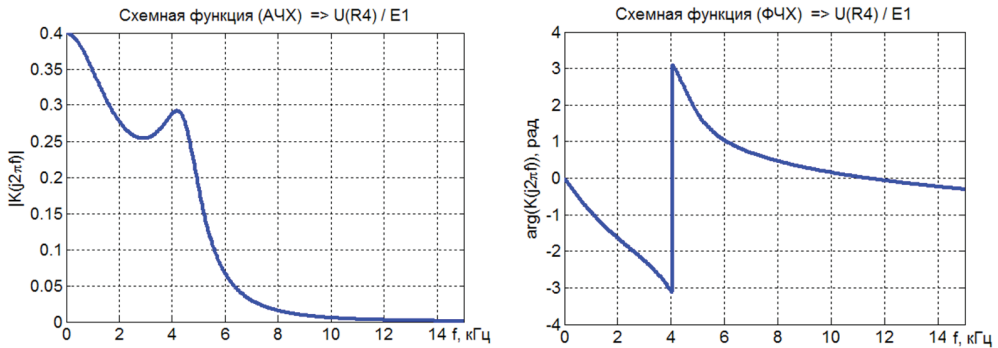


Рис. 7.5. Вывод данных о результатах преобразования ММС «время — частота»

Нажатием на кнопку Расчет схемных функций (появляется после завершения процесса перехода) запускается цикл расчета схемных функций и построения графиков их модулей (АЧХ) и аргументов (ФЧХ) (см. рис. 7.6). Каждый график строится в отдельном окне, в заголовке графика указываются вид характеристики и сведения о соответствующей схемной функции. Графики рассчитанных зависимостей по команде **Edit/Copy figure** могут быть скопированы и вставлены в отчет о самостоятельной работе.

Рис. 7.6. Графики схемной функции  $K(p) = U_{R4}(p) / E_1(p)$ 

Если необходимо наложить несколько графиков зависимостей на одних осях, то следует воспользоваться представлением численных результатов расчета схемных функций, обратившись в рабочем пространстве к свойству **SchFun** объекта **lMMC**. Для этого из общего массива данных выделяется группа интересующих пользователя элементов выходного вектора и на одних и тех же осях проводится построение графиков, как это показано на рис. 7.7 (графики построены для схемы Filter1).

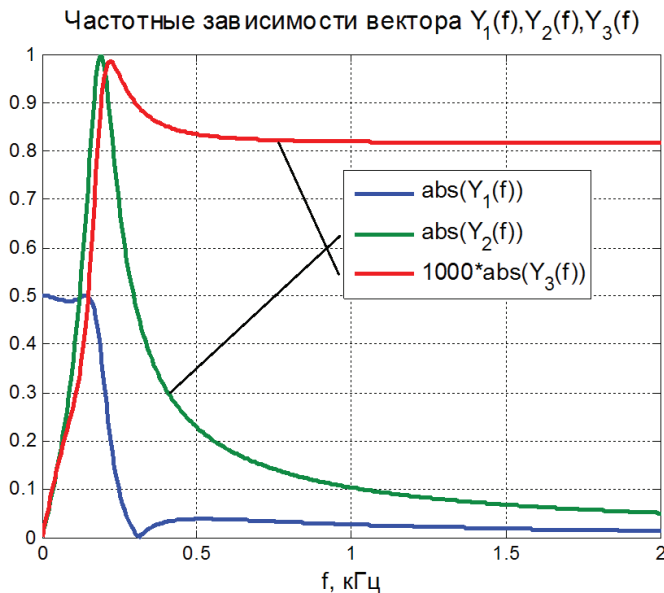


Рис. 7.7. Совместный график трех частотных зависимостей после его копирования в отчет

Список и состав команд, выполняемых в командном окне, приведен ниже.

```
Y = lmmc. SchFun;
f = lmmc.f;
figure, plot(f, abs([Y(1,:); Y(2,:); 1000*Y(3,:)]),...
    'LineWidth',2)
xlabel ({'f, кГц'}, 'FontSize',12);
grid on
title ('Частотные зависимости вектора Y_1(f), Y_2(f), Y_3(f)',...
    'FontSize',13);
h=legend ('abs (Y_1(f))', 'abs (Y_2(f))', '1000*abs (Y_3(f))',3);
set (h,'FontSize',12)
```

## 7.2. Выполнение индивидуального задания

Покажем на примере выполнение индивидуального задания № 13: провести сравнительное исследование различных расчетных процедур схемной функции  $K_U(p) = U_2(p) / U_1(p)$  для линейной схемы (ФНЧ Кауэра 3-го порядка), представленной на рис. 7.8.

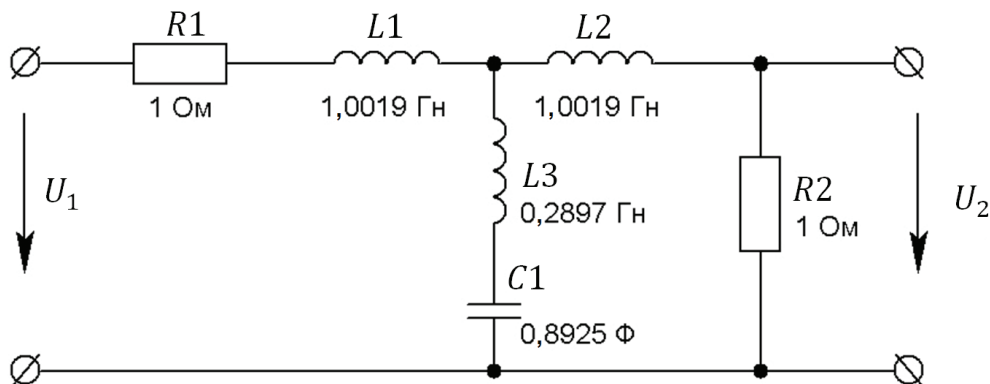


Рис. 7.8. Принципиальная схема анализируемой цепи (ФНЧ Кауэра 3-го порядка)

**Пример 7.1.** Анализ схемных функций линейной схемы Filter1 с помощью различных методов расчета.

Выполнение задания начинается с создания текстового файла **Filter1.lst** со списочной моделью исходной ПЭСх (см. указания п. 1.2.5).

```

*   Списочная модель электронной схемы  Filtr1
*B   Y       ND       NT       NX       NS
  8   6       0       0       0       0
*   Списочная модель
*Элем НУ   КУ       Параметр       Состояние
E1       0       1           1.0000
R1       1       2           1.0000
L1       2       3           1.0019   0.00
L2       3       4           1.0019   0.00
L3       3       5           0.2897   0.00
C1       5       0           0.8925   0.00
R2       4       0           1.0000
R11      2       3           1.0000e3

```

В последней строке списка элементов вставлено описание дополнительного сопротивления **R11**, включенного параллельно индуктивности **L1**. Необходимость его появления на эквивалентной схеме вызвана тем, что к узлу 3 на принципиальной схеме подключены три индуктивности, образуя индуктивную «звезду». Такая схема называется схемой с особенностью, сделать ее «неособенной» можно за счет включения сопротивления большой величины, параллельного одной из индуктивностей (рис. 7.9). Здесь параметр дополнительного сопротивления **R11** выбран в тысячу раз больше любого из параметров других сопротивлений схемы, что находится в пределах относительной погрешности вычислений (**RelTol=0,001**).

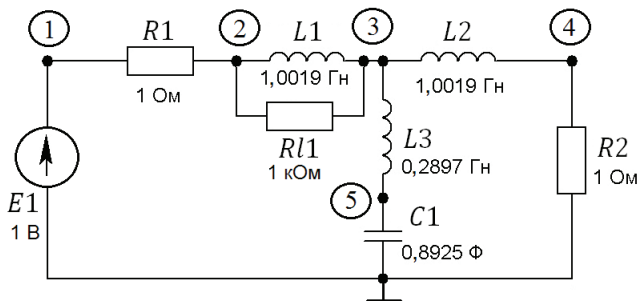


Рис. 7.9. Эквивалентная схема анализируемой цепи Filter1

После обращения к программе **СХЕМА** получен текстовый файл **Filtr1M.lst** с описанием схемы в виде набора идеальных элементов — двухполюсников.

```

*      21-Dec-2016 10:46:51
*      Списочная модель электронной схемы Filtr1
*      В      Y      ND      NT      NX      NS
      8      6      0      0      0      0
*Элем  НУ      КУ      Параметр
E1      0      1      1
R1      1      2      1
L1      2      3      1.002
L2      3      4      1.002
L3      3      5      0.2897
C1      5      0      0.8925
R2      4      0      1
R11     2      3      1e+003

```

Информация о схеме в линейном режиме сохранена в текстовом файле **Filtr1.ltp**.

```

*      21-Dec-2016 10:47:12
*      Информация о схеме Filtr1 в ЛИНЕЙНОМ режиме (малых сигналов)
*      == ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СХЕМЕ Filtr1 ==
*      Габаритные числа схемы Filtr1
*      BU  BE  BC  BR  BH  BS  BG  BL  BI  BJ  ND  NT  BM  NX  NS
      0   1   1   3   0   0   0   3   0   0   0   0   0   0   0
*      Топологическая матрица Pх схемы Filtr1
      L3      L1      L2
E1      1      0      1
C1     -1      0      0
R1     -1      0     -1
R2      0      0     -1
R1     -1      1     -1
*
*      == ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СХЕМЕ Filtr1 ==
*      Вектор взаимных индуктивностей M

*      Вектор индуктивностей хорд L
      0.2897      1.002      1.002
*      Вектор индуктивностей ребер Г

*      Вектор емкостей ребер C
      0.8925
*      Вектор емкостей хорд S

*      Вектор сопротивлений ребер R
      1      1      1e+005

```

```

* Вектор проводимостей хорд G

* Вектор напряжений независимых источников E
1
* Вектор токов независимых источников I

* ===== ФОРМУЛЯР СХЕМЫ Filtr1 =====
* Габаритные числа электронной схемы Filtr1
*   В   Y   ND   NT   NX   NS
*   8   6   0   0   0   0
* Списочная модель схемы Filter1
* Элем  НУ   КУ   Параметр
E1      0   1     1.0000    0.0000
C1      5   0     0.8925    0.0000
R1      1   2     1.0000    0.0000
R2      4   0     1.0000    0.0000
R11     2   3    1000.0000    0.0000
L3      3   5     0.2897    0.0000
L1      2   3     1.0019    0.0000
L2      3   4     1.0019    0.0000

```

Математическая модель линейной схемы во временной области формируется с помощью программы СИСТЕМА и сохраняется в текстовом файле **Filtr1.lmc**.

```

*      21-Dec-2016 11:24:40
* МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМЫ Filtr1
* BV   BW   BU
*   4   1   3
*      МАТРИЦЫ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ
* H1 =
* 0.0000000000e+0  1.1204481793e+0  0.0000000000e+0  0.0000000000e+0
* -3.4518467380e+0 -3.4552985847e+3  3.4518467380e+3 -3.4552985847e+3
* 0.0000000000e+0  9.9800399202e+2 -9.9800399202e+2  9.9800399202e+2
* 0.0000000000e+0 -9.9900199601e+2  9.9800399202e+2 -1.0000000000e+3
* D1 =
* 0.0000000000e+0
* 3.4518467380e+0
* 0.0000000000e+0
* 9.9800399202e-1
*      МАТРИЦЫ УРАВНЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЯ
* Hyl =
* 0.0000000000e+0  0.0000000000e+0  0.0000000000e+0  1.0000000000e+0

```

```

0.0000000000e+0  1.0000000000e+0  0.0000000000e+0  0.0000000000e+0
0.0000000000e+0  1.0000000000e+0 -1.0000000000e+0  1.0000000000e+0
*   Dyl =
0.0000000000e+0
0.0000000000e+0
0.0000000000e+0
*   ВЕКТОР УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СХЕМЫ W =
E1
*   ВЕКТОР НАБЛЮДЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СХЕМЫ Y =
U(R2)
I(L1)
I(R11)
*   ВЕКТОР СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СХЕМЫ V =
C1
L3
L1
L2

```

Текстовый файл **Filtr1.lmc** с матрицами линейной схемы является исходным для расчета схемных функций с использованием программы **ФУНКЦИЯ**. Дальнейшие действия строятся следующим образом:

1) запускается ресурсный файл **FYNKLI.IIA.fig** и вводится файл **Filtr1.lmc** с математической моделью схемы;

2) выполняется формирование и расчет схемных функций в выбранных частотных точках для трех вариантов преобразования временной математической модели в частотные: метод Леверье—Фаддеева, *m*-функция **ss2tf** и **LTI**-объект;

3) проводится сравнительный анализ дробно-рациональных выражений полученных схемных функций;

4) строятся и сравниваются между собой совместные графики модулей и аргументов одинаковых схемных функций.

**Метод Леверье—Фаддеева.** После выполнения указанных выше первого и второго пунктов и записи в выходной файл **Filtr1.fun** полей структуры

```

===== Состав структуры объекта в линейном режиме =====
LMC      : [1x1 struct]
NameV    : C1          L3          L1          L2
NameW    : E1          '
NameY    : U(R2)       I(L1)       I(R11)

```



```

Lambda      : 0 0 0 0 0
Ty          :
VidF        : Линейное изменение частоты
ParF         : 0 2 300
ParF1        : 0 2.000000e-001 50
ParF2        : 3 4 50
NazvMet      : Метод Леверье-Фаддеева
SchFun       : 0
f           : 0
Schema      : Filtr1.lmc
LTI         : Filtr1

```

будут вычислены необходимые для проведения анализа линейной схемы следующие числовые данные:

```

***** Собственные числа матрицы состояния H1 (1/мс) *****
-5451.67+0i -0.3164-1.14747i -0.3164+1.14747i -0.9975+0i
      Число обусловленности cond(H1) = 7.965548e+003
***** Постоянные времени электронной схемы (мс) *****
0.00018      3.16119      3.16119      1.00250
***** Частоты собственных колебаний схемы (кГц) *****
0.00000      -0.18263      0.18263      0.00000

```

Первое собственное число по модулю на три порядка превышает три остальные и поэтому должно быть отнесено к «паразитному» числу, появившемуся в результате повышения порядка временной математической модели с трех до четырех.

Нажатие кнопки Полуаналитическая форма ММС запускает процедуру преобразования матриц временной модели в коэффициенты полиномов частотной модели, в результате выполнения которой в файл **Filtr1.fun** заносится следующий текст (нажимается кнопка Вывод на панели Файлы):

```

===== ПРОГОН АЛГОРИТМА ФАДДЕЕВА =====
      Шаг m = 1
Кoeffициенты полинома знаменателя Lambda[.]
1.00000 5453.30258 0.00000 0.00000 0.00000
Матричный коэффициент числителя L(3)
5453.30258 1.12045 0.00000 0.00000
-3.45185 1998.00399 3451.84674 -3455.29858
0.00000 998.00399 4455.29858 998.00399
0.00000 -999.00200 998.00399 4453.30258

```

```

*** Матрица схемных функций числителя T[3] = Нул*L[3]*Дл ***
0.99800
3.45185
4.44985
Шаг m = 2
Коэффициенты полинома знаменателя Lambda[.]
1.00000 5453.30258 8889.25011 0.00000 0.00000

Матричный коэффициент числителя L(2)
8885.38249 2238.65994 3867.61539 -3871.48301
-6896.80356 1992.02393 3444.95685 -3444.95679
-3444.95682 996.01197 3452.26939 0.00000
3448.40178 -996.01197 -0.00003 3448.82440
*** Матрица схемных функций числителя T[2] = Нул*L[2]*Дл ***
996.01197
3448.40178
3.44496
Шаг m = 3
Коэффициенты полинома знаменателя Lambda[.]
1.00000 5453.30258 8889.25011 11165.59161 0.00000

Матричный коэффициент числителя L(1)
3438.08062 2231.95959 3859.89563 -3859.89556
-6876.16131 -0.00000 0.00000 -0.00000
-3438.08066 -0.00000 3867.61540 3859.89560
3438.08066 -0.00000 3859.89560 3859.89560
*** Матрица схемных функций числителя T[1] = Нул*L[1]*Дл ***
3.85986
3438.08069
3.85990
Шаг m = 4
Коэффициенты полинома знаменателя Lambda[.]
1.00000 5453.30258 8889.25011 11165.59161 7704.37988

Матричный коэффициент числителя L(0)
-0.00254 -0.00000 0.00000 -0.00000
0.00001 0.02132 -0.02385 0.02387
0.00002 0.02646 -0.02898 0.02646
0.00001 0.01275 -0.01274 0.01021
----- sum( abs( Lo*Нл+Lambda0*I ) ) = 1.89228519e-001 -----
*** Матрица схемных функций числителя T[0] = Нул*L[0]*Дл ***
3852.19121
-0.00002
-0.00001

```

```

===== РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГОНА АЛГОРИТМА ФАДДЕЕВА =====
*** Коэффициенты полинома знаменателя Lambda[.] ***
1.00000  5453.30258  8889.25011  11165.59161  7704.37988
*** Матрица схемных функций числителя T ***
0.00000   0.99800   996.01197    3.85986  3852.19121
0.00000   3.45185  3448.40178   3438.08069   -0.00002
0.00000   4.44985   3.44496    3.85990   -0.00001

```

Нажатие кнопки **Расчет схемных функций** запускает цикл по расчету комплексных значений схемных функций на заданной сетке частот и последующему построению отдельных графиков их модулей (АЧХ) и аргументов (ФЧХ). Каждый график строится в отдельном окне, общее число которых в два раза больше числа схемных функций (рис. 7.10).

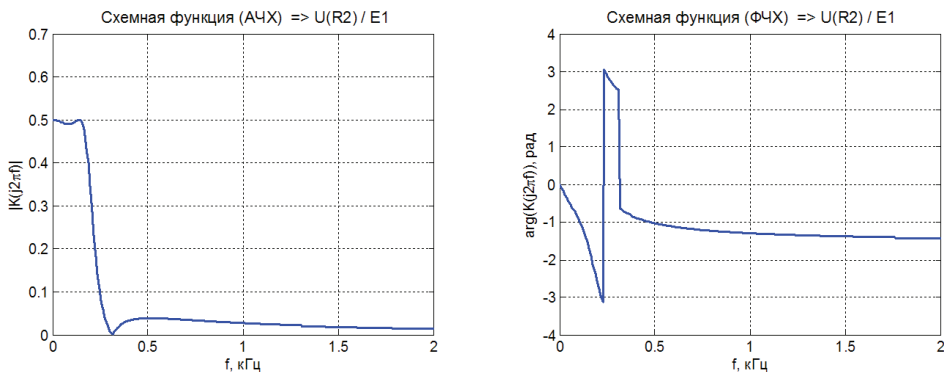


Рис. 7.10. Графики схемной функции  $K(p) = U_{R_2}(p)/E_1(p)$

**Метод  $m$ -функции `ss2tf`.** В этом варианте результаты преобразований практически совпадают с результатами, приведенными выше для варианта преобразования Леверье–Фаддеева. Отличие состоит лишь в наименовании варианта преобразования в поле **NazvMet** структуры **lmmc**. Нажатие кнопки **Полуаналитическая форма ММС** вызывает команду обращения к  $m$ -функции `ss2tf`, в результате выполнения которой в нижнем окне появляется текстовое представление коэффициентов полиномов дробно-рациональных функций:

```

===== ПЕРЕХОД ПО МЕТОДУ ss2tf =====
Скалярный полином знаменателя Lambda(1:5)
1.00000 5453.30258 8889.25011 11165.59161 7704.38242
Матричные коэффициенты числителя T для входа E1
T(1) = 0.00000 0.99800 996.01197 3.85986 3852.19122
T(2) = 0.00000 3.45185 3448.40178 3438.08069 -0.00000
T(3) = 0.00000 4.44985 3.44496 3.85990 -0.00000

```

Расчет схемных функций выполняется в цикле на той же сетке частот и заканчивается построением отдельных графиков их модулей (АЧХ) и аргументов (ФЧХ), аналогичных описанным выше и представленных на рис. 7.10.

**Метод tf объекта LTI.** В этом варианте результаты преобразований первых двух пунктов практически совпадают с результатами, приведенными выше для двух вариантов преобразований. Отличие состоит лишь в наименовании варианта преобразования в поле **NazvMet** структуры **lmmc**. А вот нажатие кнопки Полуаналитическая форма ММС создает в нижнем окне действительно полуаналитическое представление дробно-рациональных функций:

```

===== ПЕРЕХОД ПО МЕТОДАМ LTI-ОБЪЕКТА =====
Схемная функция выходного параметра U(R2)
0.998*p^3 + 996.012*p^2 + 3.8599*p + 3852.1912
K(p) = -----
p^4 + 5453.3026*p^3 + 8889.2501*p^2 + 11165.5916*p + 7704.3824

Схемная функция выходного параметра I(L1)
3.4518*p^3 + 3448.4018*p^2 + 3438.0807*p - 1.8474e-010
K(p) = -----
p^4 + 5453.3026*p^3 + 8889.2501*p^2 + 11165.5916*p + 7704.3824

Схемная функция выходного параметра I(R11)
4.4499*p^3 + 3.445*p^2 + 3.8599*p + 7.7081e-013
K(p) = -----
p^4 + 5453.3026*p^3 + 8889.2501*p^2 + 11165.5916*p + 7704.3824

```

Сравнение показанных в окне коэффициентов полиномов числителя и знаменателя с полученными ранее показывает их практическое совпадение (ошибка менее 0,1 %).

Нажатие кнопки **Расчет схемных функций** запускает модуль **lti-view**, с помощью которого можно посмотреть большинство графических образов временных (рис. 7.11) и частотных характеристик линейной схемы. Переход к показу другой характеристики выполняется таким образом: указатель мыши устанавливается на поле прежнего изображения, нажимается правая клавиша мыши и в цепи раскрывающихся списков находится название требуемой характеристики (см. рис. 7.12). После этих действий на поле просмотрщика строится новый (требуемый) графический образ (см. рис. 7.13).

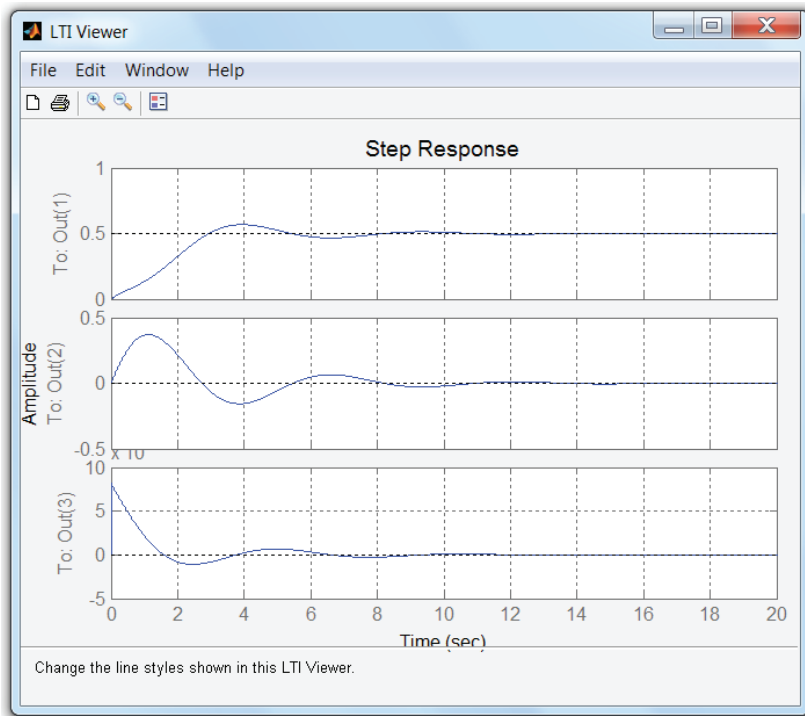


Рис. 7.11. Графики переходных характеристик в окне LTIVIEWER

При анализе характеристик, построенных в **LTIVIEWER**, следует иметь в виду следующее: здесь все временные и частотные масштабы представлены в системе СИ, т. е. время в секундах, а частота — в герцах. Радиотехнический масштаб, использованный в примере выше, отличается в 1000 раз: время в миллисекундах, а частота — в килогерцах. Во всем остальном графики практически совпадают.

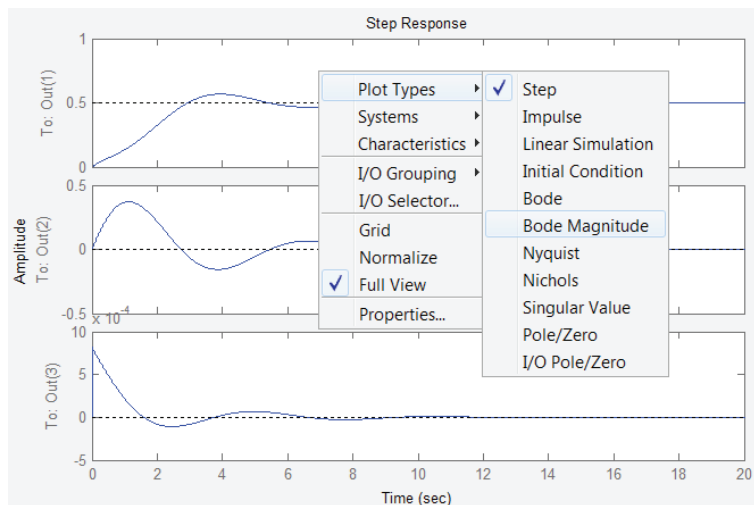


Рис. 7.12. Переход к построению графиков переходных характеристик в окне LTIVIEWER

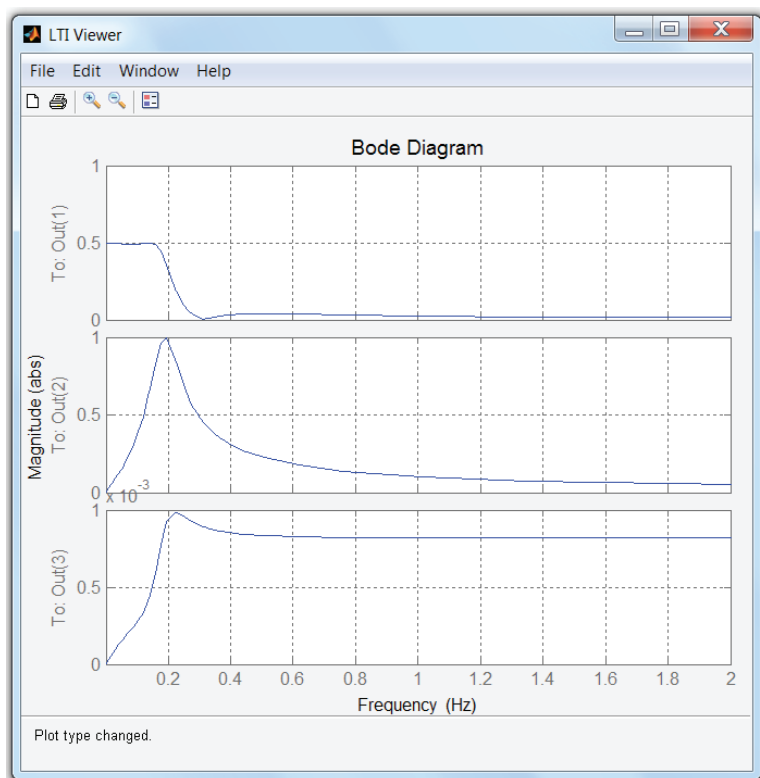


Рис. 7.13. Графики модулей схемных функций в окне LTIVIEWER

**Собственные свойства схемы.** Расчеты в этом варианте носят вспомогательный характер, поскольку результаты преобразований относятся только к знаменателю схемных функций:

$$K(p) = \frac{T(p)}{\lambda(p)} = \frac{1}{p^n + \lambda_{n-1}p^{n-1} + \dots + \lambda_1p + \lambda_0}. \quad (7.4)$$

Как известно, у всех схемных функций линейной схемы полином знаменателя один и тот же и носит название характеристического полинома матрицы состояния. Задача определения его корней соответствует задаче расчета собственных значений матрицы и выполняется в этом пункте.

На рис. 7.14 показаны графики частотных зависимостей модуля и фазы схемной функции  $K(p)$ , представленной выражением (7.4). Естественно, они отличаются от найденных выше схемных функций, и это различие определяется только влиянием полинома числителя, не равного единице в соответствующей схемной функции.

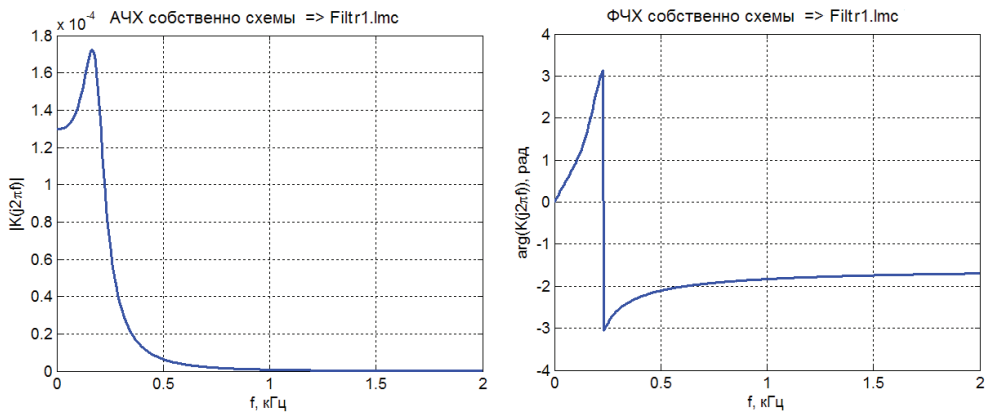


Рис. 7.14. Графики собственной схемной функции  $K_f(p)$

## 7.3. Оформление отчета по индивидуальному заданию

1. Исходная ПЭСх.
2. Цель исследования схемы и постановка задачи анализа.

3. Обоснование выбора программы **ФУНКЦИЯ**, выбор методов преобразования математической модели схемы, параметров моделей и самого моделирования, в частности набора частотных точек.
4. Чертеж и содержание текстового файла со списочной моделью ПЭСх.
5. Содержание текстового файла с дискретной списочной моделью ПЭСх, представленной двухполюсниками (развернутой схемы).
6. Чертеж этой развернутой схемы, выполненный по нормам ЕСКД.
7. Матрицы и векторы линейной математической модели (ИММС) с пояснениями их содержания (фрагменты lmc-файла).
8. Структура объекта ИММС, ее описание с указанием наименований полей и пояснений их содержания.
9. Графические представления частотных зависимостей схемных функций с указанием масштабов. При необходимости на графиках проставляются контрольные точки с числовыми данными.
10. Выводы по результатам решения поставленной задачи и рекомендации по направлению дальнейших исследований в самостоятельной работе.

### **Контрольные вопросы и задания**

---

1. Поясните по блок-схеме работу программы **ФУНКЦИЯ** при расчете АЧХ некоторой линейной цепи по алгоритму Леверье—Фаддеева.
2. Дайте определение схемной функции линейной электронной схемы. Обязательно ли в этом определении использовать понятие «четырёхполюсник»?
3. Схемная функция любой стационарной линейной схемы может быть представлена в виде дробно-рациональной функции комплексной частоты. Какова причина такого представления математической модели схемы, каким образом она связана с моделью схемы во временной области?
4. Поясните, какие свойства линейной схемы описывают числитель и знаменатель схемной функции? Как эти свойства связаны с корнями полиномов числителя и знаменателя схемной функции?



5. Поясните информационные связи между учебными программами СХЕМА, СИСТЕМА и ФУНКЦИЯ. С помощью каких носителей информации они реализованы?
6. Каким образом можно определить порядок линейной схемы? Приведите ручной и машинный методы его определения.
7. Предложите изменения в алгоритме расчета коэффициента передачи  $K(j\omega)$  линейной цепи для определения другой схемной функции, например, входного сопротивления  $Z_{вх}(j\omega)$ .

## 8. Анализ чувствительности электронной схемы в статическом режиме

---

Определение уровня влияния некоторого внутреннего параметра схемы на какой-либо выходной параметр — задача пятнадцатого варианта индивидуального задания. В процессе параметрической оптимизации схемы нужно уметь выбрать тот внутренний параметр, изменения которого в наибольшей степени влияют на не удовлетворяющий схемотехника выходной параметр. Однако подстройка одного внутреннего параметра может повлечь за собой изменение нескольких выходных параметров, в том числе и нежелательное. Поэтому отработка принципиальных схем должна базироваться на четкой информации о количественной связи изменения выходных параметров  $Y$  с отклонениями внутренних  $X$  и внешних  $Q$  параметров. Как известно, связь между этими параметрами устанавливается с помощью функции схемы:

$$Y = F(X, Q). \quad (8.1)$$

В развернутом виде это соотношение состоит из  $k$  отдельных функций вида

$$Y_i = F_i(X_1, X_2, \dots, X_n; Q_1, Q_2, \dots, Q_m), \quad i = 1 \dots k. \quad (8.2)$$

Если эти зависимости известны, то, воспользовавшись разложением их в ряд Тейлора по всем аргументам с точностью до главных членов, получим соотношения для конечных приращений выходных параметров

$$dY_i = \sum_{j=1}^n \frac{F_i(X_0; Q_0)}{\partial X_j} dX_j + \sum_{l=1}^m \frac{F_i(X_0; Q_0)}{\partial Q_l} dQ_l, \quad (8.3)$$

где частные производные вычисляются при номинальных значениях параметров  $X_0$  и  $Q_0$ . Эти производные называются *абсолютными коэффициентами чувствительности* и обозначаются как

$$A_{ij} = \sum_{l=1}^n \frac{F_l(\mathbf{X}_0; \mathbf{Q}_0)}{\partial X_j}, \quad i=1\dots k, \quad j=1\dots m. \quad (8.4)$$

Внешние параметры в дальнейшем будем считать строго постоянными и известными, поэтому вторая сумма в формуле (8.3) превратится в нуль. Это упростит последующие математические соотношения, не уменьшая общности выводов. Количество элементов вектора выходных параметров  $\mathbf{Y}$  обозначим  $by$  (вместо  $k$  в формуле (8.4)), количество изменяющихся внутренних параметров —  $bх$  (вместо  $m$  в той же формуле).

Итак, объединяя формулы (8.3) и (8.4) при сделанном выше предположении, получим матрично-векторное соотношение

$$d\mathbf{Y} = A d\mathbf{X}, \quad (8.5)$$

являющееся линеаризацией нелинейной (в общем случае) функции схемы (8.1) при номинальных значениях элементов вектора внутренних параметров  $\mathbf{X}$ .

Часто вводят безразмерные относительные величины

$$B_{ij} = A_{ij} \frac{X_{j,0}}{Y_{i,0}} = \frac{\partial F_i(\mathbf{X}_0)}{\partial X_j} \frac{X_{j,0}}{Y_{i,0}} = \frac{\partial \ln F_i(\mathbf{X}_0)}{\partial \ln X_j}, \quad j=1\dots bх; \quad i=1\dots by, \quad (8.6)$$

которые характеризуют влияние относительного отклонения внутреннего параметра  $\delta X_j = \partial X_j / X_j$  на относительное изменение выходного параметра  $\delta Y_i = \partial Y_i / Y_i$ . Их называют *относительными коэффициентами чувствительности*. Таким образом, для относительных приращений векторов  $\mathbf{Y}$  и  $\mathbf{X}$  справедливо соотношение

$$\delta \mathbf{Y} = B \delta \mathbf{X}. \quad (8.7)$$

Итак, анализ чувствительности электронной схемы в нашем случае сводится к задаче вычисления матриц коэффициентов чувствительности  $A$  или  $B$ .

## 8.1. Прямой метод решения задачи чувствительности

В прямом методе для выполнения этого задания необходимо использовать две учебные программы из пакета прикладных программ АНАЛИЗ, разработанного в среде MATLAB. Пакет создан специально

но для анализа небольших ПЭСх в трех режимах работы. В индивидуальном задании речь идет о статическом режиме, поэтому информация о ПЭСх в исходном файле с расширением **\*.lst** преобразуется программой СХЕМА в файл с расширением **\*.stp**, который может «прочитать» программа СТАТИКА. Поскольку в задании необходимо определить влияние параметров сопротивлений или моделей транзисторов в статическом режиме, то подготавливаются две ПЭСх — первая схема исходная (с расширением **\*1.lst**), другая схема (с расширением **\*2.lst**) с отклонением на  $\delta_j = 3\text{--}5\%$  того параметра  $x_j$ , степень влияния которого нужно вычислить. Оба эти файла пропускают последовательно через программы СХЕМА и СТАТИКА (рис. 8.1). Далее полученные результаты, сохраненные в файлах **\*1.sta** и **\*2.sta**, сравнивают и находят приращение  $\Delta_i = y2_i - y1_i$  искомой электрической величины  $y_i$ . Отношение приращения  $\Delta_i$  наблюдаемого параметра к абсолютному приращению изменяемого параметра  $\Delta_j = \delta_j x_j$  представляет собой искомый абсолютный коэффициент чувствительности  $A_{ij}$ , отношение  $B_{ij} = \delta_i / \delta_j$  — относительный коэффициент чувствительности, где относительная величина приращения  $\delta_i = \Delta_i / y1_i$ .

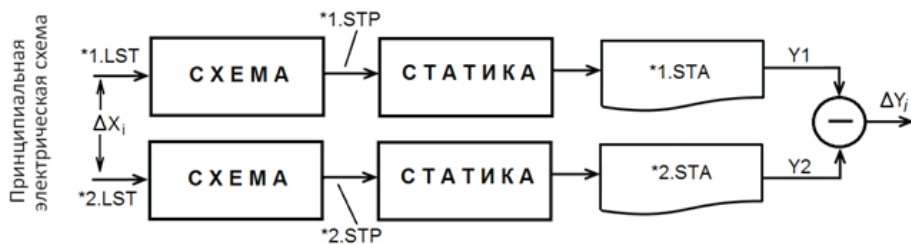


Рис. 8.1. Структурная схема алгоритма анализа чувствительности по постоянному току

## 8.2. Выполнение индивидуального задания

Пусть в индивидуальном задании (см. рис. 8.2) необходимо определить матрицы абсолютных  $A$  и относительных  $B$  коэффициентов чувствительности падения напряжения база — эмиттер обоих транзисторов к изменению параметра сопротивления  $R1$ .

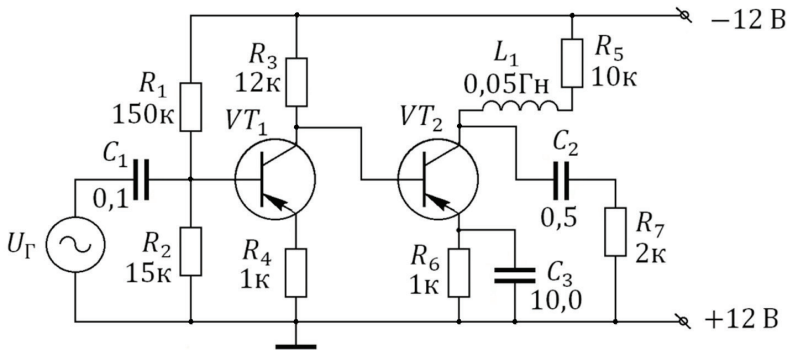


Рис. 8.2. Исходная схема индивидуального задания

**Шаг 1.** По исходной ПЭСх составляются два текстовых файла: **usil1.lst** — без изменения параметра сопротивления  $R_1$  (150 кОм) и **usil2.lst** — с увеличенным на  $\delta_{R_1} = 3\%$  параметром (154,5 кОм). Абсолютная величина приращения равна  $\Delta_{R_1} = 4,5$  кОм.

\* Габаритные числа схемы usil1

* В	Y	ND	NT
15	11	0	2

\* Списочная модель схемы

*Элем.	HU	KU	Параметр
Eu1	0	1	0.000e00
E2	3	0	12.00
C1	1	2	0.10
C2	8	0	10.00
C3	7	9	1.00
R4	0	5	1.00
R6	0	8	1.00
R7	0	9	2.00
R5	6	3	10.00
R3	4	3	12.00
R2	0	2	15.00
R1	2	3	150.00
L1	7	6	0.05
Q1	4	2	5 Qrom
Q2	7	4	8 Qrom

\* Габаритные числа схемы usil2

* В	Y	ND	NT
15	11	0	2

\* Списочная модель схемы

*Элем.	HU	KU	Параметр
Eu1	0	1	0.000e00
E2	3	0	12.00
C1	1	2	0.10
C2	8	0	10.00
C3	7	9	1.00
R4	0	5	1.00
R6	0	8	1.00
R7	0	9	2.00
R5	6	3	10.00
R3	4	3	12.00
R2	0	2	15.00
R1	2	3	154.50
L1	7	6	0.05
Q1	4	2	5 Qrom
Q2	7	4	8 Qrom

**Шаг 2.** С помощью программы СХЕМА получают два **stp**-файла с топологической и параметрической информацией о схеме и ее «клоне» в статическом режиме. Заметим, все реактивности в экви-

валентных схемах исключены, остались только одни сопротивления и независимые и зависимые источники.

* == ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СХЕМЕ usil1 И СХЕМЕ usil2 ==													
* Габаритные числа схемы usil1M													
* BU	BE	BR	BG	BI	BJ	ND	NT	NX	NS				
0	1	9	3	0	4	0	2	0	0				
* Топологическая матрица Pk схемы usil1aM и схемы usil2aM													
	R1	Rc1	Rc2	Jp1e	Jp1k	Jp2e	Jp2k						
E2	-1	-1	0	0	-1	1	0						
Re1	0	0	0	1	0	0	0						
Re2	0	0	0	0	0	1	0						
Rb1	0	-1	0	-1	-1	0	0						
Rb2	0	0	-1	0	0	-1	-1						
R4	0	0	0	1	0	0	0						
R6	0	0	0	0	0	1	0						
R5	0	0	-1	0	0	0	-1						
R3	0	-1	1	0	-1	1	1						
R2	-1	-1	0	-1	-1	0	0						
* == ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СХЕМЕ usil1aM И О СХЕМЕ usil2aM ==													
* Вектор сопротивлений ребер R													
0.01	0.01	0.06	0.06			1	1	10	12	15			
* Вектор проводимостей хорд G usil1aM						* Вектор проводимостей хорд G usil2aM							
0.006667	0.003333	0.003333				0.006472	0.003333	0.003333					
* Вектор напряжений независимых источников E													
12													
* Вектор токов независимых источников													
* === ФОРМУЛЯР СХЕМЫ usil1M ===						* === ФОРМУЛЯР СХЕМЫ usil2M ===							
* Габаритные числа схемы usil1M						* Габаритные числа схемы usil2M							
* В	Y	ND	NT	NX	NS	* В	Y	ND	NT	NX	NS		
17	11	0	2	0	0	17	11	0	2	0	0		
* Списочная модель схемы usil1M						* Списочная модель схемы usil2M							
* Элем	HV	KV	Параметр			* Элем	HV	KV	Параметр				
E2	2	0	12.0000			0.0000	E2	2	0	12.0000			0.0000
Re1	4	9	0.0100			0.0000	Re1	4	9	0.0100			0.0000
Re2	6	10	0.0100			0.0000	Re2	6	10	0.0100			0.0000
Rb1	1	7	0.0600			0.0000	Rb1	1	7	0.0600			0.0000
Rb2	3	8	0.0600			0.0000	Rb2	3	8	0.0600			0.0000
R4	0	4	1.0000			0.0000	R4	0	4	1.0000			0.0000
R6	0	6	1.0000			0.0000	R6	0	6	1.0000			0.0000
R5	5	2	10.0000			0.0000	R5	5	2	10.0000			0.0000
R3	3	2	12.0000			0.0000	R3	3	2	12.0000			0.0000
R2	0	1	15.0000			0.0000	R2	0	1	15.0000			0.0000
R1	1	2	150.0000			0.0000	R1	1	2	154.5000			0.0000
Rc1	7	3	300.0000			0.0000	Rc1	7	3	300.0000			0.0000
Rc2	8	5	300.0000			0.0000	Rc2	8	5	300.0000			0.0000

Jp1e	7	9	0.0000	0.0000	Jp1e	7	9	0.0000	0.0000
Jp1k	7	3	0.0000	0.0000	Jp1k	7	3	0.0000	0.0000
Jp2e	8	10	0.0000	0.0000	Jp2e	8	10	0.0000	0.0000
Jp2k	8	5	0.0000	0.0000	Jp2k	8	5	0.0000	0.0000

**Шаг 3.** Перед обращением к программе СТАТИКА нужно ознакомиться с правилами пользования ее интерфейсом. Запускается программа СТАТИКА и вводится сначала файл **usil1m.stp**, в файле **usil1m.sta** запоминается решение статического режима. Затем, не меняя настройки программы СТАТИКА, то же самое проделывается с файлом **usil2m.stp**. В результате получаются два близких по числовым данным решения.

Фрагмент файла с решением статического режима схемы usil1					
*      Статическая матрица      схемы usil1M      Enn =					
	-14.1296011917	-12.6331505817	-0.4863564855	-0.4706690849	
	-12.6331505817	-23.2892956972	10.6540832344	10.3104363895	
	-0.4863564855	10.6540832344	-12.2082725221	-10.8370728829	
	-0.4706690849	10.3104363895	-10.8370728829	-20.1649742898	
*      Вектор влияния независимых источников      Nw =					
	1.5502979447	-10.0622463801	11.6126192944	-0.3748857631	
* ===== Рабочие точки транзисторов =====					
	Jp1e	Jp1k	Jp2e	Jp2k	
Uop	0.20036	-0.40596	0.21415	0.22198	[В]
Iop	0.79419	-0.78637	1.17683	-1.08266	[мА]
Pop	0.15912	0.31923	0.25202	-0.24033	[мВт]
* ===== Электрические данные независимых источников =====					
Позиционное обозначение	Напряжение [В]	Ток [мА]	Рассеиваемая мощность [мВт]		
E2	12.000	2.03787	24.45445		
* ===== Электрические данные сопротивлений резисторов =====					
Позиционное обозначение	Параметр [кОм]	Напряжение [В]	Ток [мА]	Рассеиваемая мощность [мВт]	
Re1	0.010	0.00794	0.79419	0.00631	
Re2	0.010	0.01177	1.17683	0.01385	
Rb1	0.060	-0.00039	-0.00646	0.00000	
Rb2	0.060	-0.00569	-0.09490	0.00054	
R4	1.000	0.79419	0.79419	0.63073	
R6	1.000	1.17683	1.17683	1.38492	
R5	10.000	10.81923	1.08192	11.70558	
R3	12.000	10.59156	0.88263	9.34842	
R2	15.000	1.00287	0.06686	0.06705	

* ===== Электрические данные проводимостей хорд =====					
Позиционное обозначение	Параметр [кОм]	Напряжение [В]	Ток [мА]	Рассеиваемая мощность [мВт]	
R1	149.993	10.99713	0.07332	0.80629	
Rc1	300.030	0.40596	0.00135	0.00055	
Rc2	300.030	-0.22198	-0.00074	0.00016	
* ===== Проверка баланса мощностей в схеме =====					
Суммарная мощность источников [мВт]		Суммарная рассеиваемая мощность [мВт]			
24.45445		= 24.45445			
Относительная ошибка проверки баланса мощностей				4.73943e-012	
Фрагмент файла с решением статического режима схемы usil2					
* Статическая матрица схемы usil2M Enn =					
-14.1629569083		-12.6652695299		-0.4875930147 -0.4718657299	
-12.6652695299		-23.3202237340		10.6528925535 10.3092841140	
-0.4875930147		10.6528925535		-12.2083183614 -10.8371172437	
-0.4718657299		10.3092841140		-10.8371172437 -20.1650172198	
* Вектор влияния независимых источников Nw =					
1.5236082329		-10.0879464866		11.6116298806 -0.3758432634	
* ===== Рабочие точки транзисторов =====					
	Jp1e	Jp1k	Jp2e	Jp2k	
Uop	0.19948	-0.45183	0.21509	0.22866	[В]
Iop	0.77120	-0.76362	1.19623	-1.08130	[мА]
Pop	0.15384	0.34503	0.25729	-0.24725	[мВт]
* ===== Электрические данные независимых источников =====					
Позиционное обозначение	Напряжение [В]		Ток [мА]	Рассеиваемая мощность [мВт]	
E2	12.000		2.03268	24.39219	
* ===== Электрические данные сопротивлений ребер =====					
Позиционное обозначение	Параметр [кОм]	Напряжение [В]	Ток [мА]	Рассеиваемая мощность [мВт]	
Re1	0.010	0.00771	0.77120	0.00595	
Re2	0.010	0.01196	1.19623	0.01431	
Rb1	0.060	-0.00036	-0.00608	0.00000	
Rb2	0.060	-0.00694	-0.11569	0.00080	
R4	1.000	0.77120	0.77120	0.59475	
R6	1.000	1.19623	1.19623	1.43097	
R5	10.000	10.80538	1.08054	11.67562	
R3	12.000	10.56978	0.88081	9.31002	
R2	15.000	0.97875	0.06525	0.06386	
* ===== Электрические данные проводимостей хорд =====					
Позиционное обозначение	Параметр [кОм]	Напряжение [В]	Ток [мА]	Рассеиваемая мощность [мВт]	
R1	154.512	11.02125	0.07133	0.78614	
Rc1	300.030	0.45183	0.00151	0.00068	
Rc2	300.030	-0.22866	-0.00076	0.00017	



```

* ===== Проверка баланса мощностей в схеме =====
Суммарная мощность          Суммарная рассеиваемая
источников [мВт]              мощность [мВт]
24.39219                      =          24.39219
Относительная ошибка проверки баланса мощностей  8.14881e-012

```

**Шаг 4.** Сопоставляются между собой два числовых вектора **Uop1** — падения напряжений на *pn*-переходах исходной схемы

	Jp1e	Jp1k	Jp2e	Jp2k	
Uop1	0.20036	-0.40596	0.21415	0.22198	[В]
Iop1	0.79419	-0.78637	1.17683	-1.08266	[мА]

и вектора **Uop2** — падения напряжений на *pn*-переходах схемы с отклонением сопротивления **R1**

Uop2	0.19948	-0.45183	0.21509	0.22866	[В]
Iop2	0.77120	-0.76362	1.19623	-1.08130	[мА]

Эти данные взяты из фрагментов **sta**-файлов с заголовком

```

* ===== Рабочие точки транзисторов =====

```

Элементы векторов с именами **Jp1e** и **Jp2e** — искомые падения напряжений база — эмиттер, абсолютные отклонения равны их разности (см. рис. 8.1):

$$\Delta U_{\text{бэ1}} = 0,19948 - 0,20036 = -0,00088[B],$$

$$\Delta U_{\text{бэ2}} = 0,21509 - 0,21415 = 0,00094[B].$$

Относительные отклонения этих падений напряжений равны:

$$\delta U_{\text{бэ1}} = \frac{\Delta U_{\text{бэ1}}}{U_{\text{бэ1}}} = -\frac{0,00088}{0,20036} = -0,00440 \cong -0,44\%,$$

$$\delta U_{\text{бэ2}} = \frac{\Delta U_{\text{бэ2}}}{U_{\text{бэ2}}} = \frac{0,00094}{0,21509} = 0,00437 \cong 0,44\%.$$

Итак, относительное изменение параметра сопротивления **R1** на 3% приводит к относительному изменению падений напряжений на переходах база — эмиттер транзисторов всего на 0,44%, т. е. почти в 7 раз

меньше. При этом влияние изменения параметра сопротивления на транзисторы противоположно: на первом транзисторе происходит уменьшение падения напряжения и эмиттерного тока, на втором транзисторе — такое же относительное увеличение напряжения и тока. Иногда эти относительные величины сопоставляют следующим образом: делят их процентные значения и получают относительные коэффициенты чувствительности в процентах к процентам:

$$B_{\bar{6}\bar{3}1 \leftarrow R1} = \frac{\delta U_{\bar{6}\bar{3}1}}{\delta R1} = \frac{-0,44\%}{3\%} = -0,147 \cong -0,15[\% / \%],$$

$$B_{\bar{6}\bar{3}2 \leftarrow R1} = \frac{\delta U_{\bar{6}\bar{3}2}}{\delta R1} = \frac{0,44\%}{3\%} = 0,147 \cong 0,15[\% / \%].$$

Рассчитаем искомые абсолютные коэффициенты чувствительности:

$$A_{\bar{6}\bar{3}1 \leftarrow R1} \cong \frac{\Delta U_{\bar{6}\bar{3}1}}{\Delta R1} = -\frac{0,00088 \text{ В}}{4,5 \text{ кОм}} = -1,96 \cdot 10^{-4} \cong -0,20[\text{мВ/кОм}],$$

$$A_{\bar{6}\bar{3}2 \leftarrow R1} \cong \frac{\Delta U_{\bar{6}\bar{3}2}}{\Delta R1} = \frac{0,00094 \text{ В}}{4,5 \text{ кОм}} = 2,09 \cdot 10^{-4} \cong 0,21[\text{мВ/кОм}],$$

### 8.3. Оформление отчета о выполнении индивидуального задания

1. Исходная ПЭСх.
2. Содержание текстового файла со списочной моделью исходной ПЭСх.
3. Содержание текстового файла со списочной моделью ПЭСх, у которой параметр заданного элемента имеет отклонение 3–5 %.
4. Содержание текстового файла со списочной моделью исходной ПЭСх, представленной двухполюсниками (развернутой схемы).
5. Чертеж этой развернутой схемы, выполненный по нормам ЕСКД.
6. Два текстовых файла со списочными моделями эквивалентных схем по постоянному току: один — для исходной схемы, другой — для схемы с измененным параметром.
7. Сравнительные результаты решения двух электронных схем: изменение в положении рабочих точек, выходных (искомых) токов и напряжений.

8. Абсолютные и относительные коэффициенты чувствительности, пояснения по точности их вычислений методом прямых приращений.
9. Выводы и рекомендации о самостоятельной работе.

## Контрольные вопросы и задания

---

1. Дайте определение понятий чувствительности электронной схемы, абсолютного и относительного коэффициентов чувствительности. Приведите конкретный пример, раскрывающий эти понятия.
2. Пусть известна некоторая функция  $i$ -го выхода электронной схемы  $Y_i = F_i(X_1, X_2, \dots, X_n)$ . Разложим эту функцию в ряд Тейлора в рабочей точке

$$Y_i = Y_{i0} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{F_i(X_0)}{\partial X_j} dX_j + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{F_i(X_0)}{2 \partial X_j \partial X_k} dX_j dX_k + \dots$$

Какие элементы разложения можно назвать коэффициентами чувствительности схемы и по каким параметрам? Каким образом коэффициенты чувствительности связаны с элементами второго порядка  $\frac{F_i(X_0)}{\partial X_j \partial X_k}$  и почему?

3. Назовите три основных машинных метода определения коэффициентов чувствительности электронной схемы и сравните их по точности и сложности вычислений.
4. Покажите на заданной в индивидуальном задании схеме действие пошагового алгоритма односторонних приращений.
5. Дайте определение линейной присоединенной схемы. Можно ли распространить это определение также и на нелинейные схемы?
6. Когда исходные схемы совпадают с присоединенными схемами? Что должно появиться в таких схемах, чтобы присоединенные схемы стали отличаться от исходных схем?
7. С какой целью в методе присоединенной схемы исходная схема разделяется на пассивный многополюсник и набор внешних источников?

8. В каких ситуациях работы схемы требуется ее анализ методом наихудшего случая? При каком условии по матрице коэффициентов чувствительности можно рассчитать параметры наихудшего случая, т. е. максимальные отклонения выходных параметров схемы при заданных отклонениях внутренних параметров?
9. Почему коэффициенты чувствительности схемы в статическом режиме, рассчитанные в учебной программе ВАРИАЦИЯ, не имеют методических ошибок? Какие ошибки все-таки возникают при определении этих коэффициентов?
10. Запишите векторно-матричное уравнение статического режима и получите из него коэффициенты чувствительности схемы по отношению к независимым источникам (источникам питания схемы).
11. Дайте определение матрицы Якоби и получите ее аналитическое выражение для полупроводникового диода. Каким образом будет строиться матрица Якоби для схемы выпрямителя с четырьмя силовыми диодами?
12. При вычислении коэффициентов чувствительности в статическом режиме используется безразмерная матрица  $\mathbf{Y1} = \left[ \begin{bmatrix} 1_n \end{bmatrix} - \mathbf{E}_{nn} \mathbf{Y} \right]^{-1}$ . Докажите свойство отсутствия размерности матрицы  $\mathbf{Y1}$ .
13. Почему при аналитическом определении коэффициентов чувствительности относительно параметров резисторов появляются трехмерные математические объекты — единичные трехмерные тензоры, например,  $\mathbf{I}_{ijk}$ ,  $i, j, k = 1 \dots br$ ?

## 9. Анализ чувствительности схемных функций линейных схем

В главе приводятся указания для выполнения шестнадцатого варианта индивидуального задания по самостоятельной работе: машинному формированию двух математических моделей, близких по параметрам линейных схем и последующему расчету разности их частотных характеристик (рис. 9.1). Условие линейности электронных схем существенно упрощает анализ чувствительности схемных функций. В этом случае произвольное по величине отклонение параметра любого элемента приводит к пропорциональному отклонению выходных параметров. Коэффициенты пропорциональности (чувствительности) не зависят от состояния схемы и определяются только параметрами элементов. Поскольку сопротивления и проводимости реактивных элементов есть функции частоты, то коэффициенты чувствительности линейных схем — частотно-зависимые дробно-рациональные функции. Поэтому алгоритмы их определения во многом похожи на алгоритмы, использованные в программе ФУНКЦИЯ.

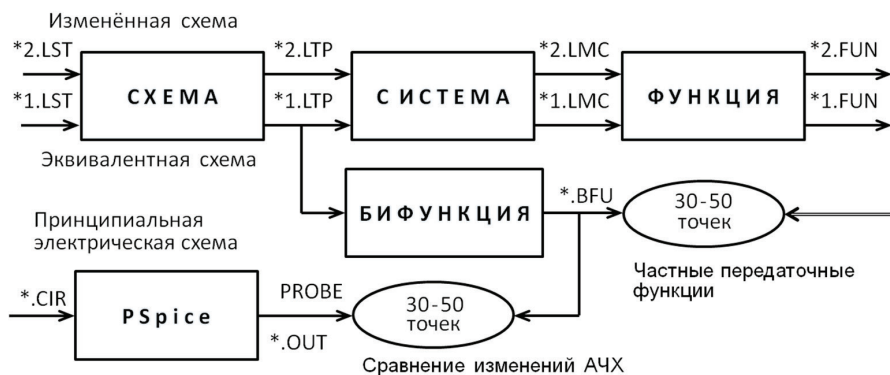


Рис. 9.1. Схема связей между учебными программами при анализе чувствительности схемных функций

Пусть коэффициент передачи линейной схемы по напряжению имеет вид:

$$K_u(p) = U_2(p) / U_1(p). \quad (9.1)$$

Выделим в ней некоторое сопротивление  $Z_i$  и определим влияние его изменения  $dZ_i$  на величину коэффициента передачи

$$\frac{dK_u(p)}{dZ_i} = \frac{d[U_2(p) / U_1(p)]}{dZ_i} = \frac{dU_2(p)}{dZ_i} \Big|_{U_1(p)=\text{const}} \quad (9.2)$$

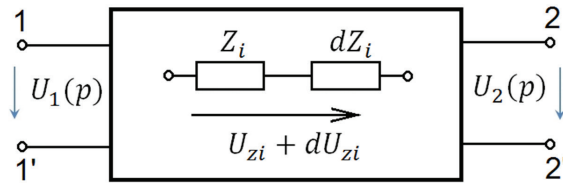


Рис. 9.2. Представление линейной схемы в виде четырехполюсника

Определим сначала величину приращения напряжения  $dU_z$  на сопротивлении  $Z_i$  при его изменении на  $dZ_i$ . В соответствии с теоремой электрических цепей, устанавливающей, что изменение токов в электрической цепи при изменении некоторого сопротивления  $Z$  на величину  $\Delta Z$  будет таким же, какое вызывается действием в ветви  $Z + \Delta Z$  ЭДС, направленной противоположно первоначальному току  $I_z(p)$  в данной ветви и равной по модулю и знаку  $\Delta Z I_z(p)$  [2]. В случае бесконечно малых приращений величина ЭДС

$$dE_z(p) = -dU_z(p) = -dZ I_z(p) = -U_z(p) dZ / Z. \quad (9.3)$$

Введем две частные передаточные функции  $K_{1z}(p)$  и  $K_{z2}(p)$ , которые означают коэффициенты передачи по напряжению от входа к сопротивлению  $Z$  и от него к выходу четырехполюсника:

$$K_{1z}(p) = \frac{U_z(p)}{U_1(p)}, \quad K_{z2}(p) = \frac{U_2(p)}{U_z(p)} \Big|_{U_1(p)=0}. \quad (9.4)$$

Очевидно,  $U_z(p) = K_{1z}(p) U_1(p)$ , поэтому с учетом выражения (9.3)

$$dU_z(p) = -K_{1z}(p) U_1(p) dZ / Z.$$

Далее, изменение напряжения на выходе  $dU_2(p)$  связано через частную передаточную функцию  $K_{z2}(p)$  с изменением напряжения  $dU_z(p)$  на  $Z$ :

$$dU_2(p) = K_{z2}(p)dU_z(p) = -K_{z2}(p)K_{1z}(p)U_1(p)dZ / Z. \quad (9.5)$$

Подставляя выражение (9.5) в (9.2), окончательно получим:

$$\frac{dK_u(p)}{dZ_i} = -\frac{K_{1z}(p)K_{z2}(p)}{Z_i}. \quad (9.6)$$

Итак, коэффициент чувствительности линейной схемы по отношению к некоторому элементу равен произведению частных передаточных функций, характеризующих передачу напряжения  $K_{1z}(p)$  от входа к этому элементу и  $K_{z2}(p)$  — от него к выходу, деленному на комплексное сопротивление этого элемента.

Подставив в уравнение (9.6) соответствующие параметрические уравнения, определим коэффициенты чувствительности по отношению к параметрам этих элементов — сопротивлению, проводимости, индуктивности и емкости:

$$\begin{aligned} \frac{dK_u(p)}{dR} &= -\frac{K_{1R}(p)K_{R2}(p)}{R}, \quad \frac{dK_u(p)}{dG} = -\frac{K_{1G}(p)K_{G2}(p)}{G}, \\ \frac{dK_u(p)}{dL} &= -\frac{K_{1L}(p)K_{RL}(p)}{L}, \quad \frac{dK_u(p)}{dC} = -\frac{K_{1C}(p)K_{C2}(p)}{C}. \end{aligned} \quad (9.7)$$

Соотношения для коэффициентов чувствительности, представленные в формуле (9.7), являются основой расчетных процедур программы БИФУНКЦИЯ.

## 9.1. Интерфейс программы БИФУНКЦИЯ

Работа с программой БИФУНКЦИЯ во многом схожа с работой в программе ФУНКЦИЯ: их интерфейсы по построению и последовательности выполняемых действий во многом совпадают. Пусть для анализа чувствительности задана исходная схема (см. рис. 9.3), схемная функция  $K_U(p) = U_2(p) / U_1(p)$  которой уже была подробно исследована с помощью программы ФУНКЦИЯ в главе 7. Требуется опре-

делить влияние изменения емкости  $C1$  на коэффициент передачи по напряжению  $K_u(p)$ .

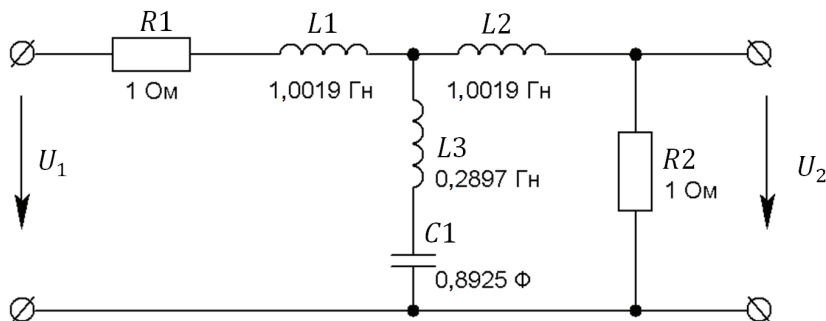


Рис. 9.3. Исходная схема для анализа чувствительности

**Шаг 1.** Сначала создается математическая модель исходной схемы в линейном режиме. Для этого по принципиальной схеме записывается эквивалентная схема (см. рис. 9.3) и составляется списочная модель в форме **\*.lst**-файла, который с помощью программы СХЕМА преобразуется в **\*.ltp**-файл.

**Шаг 2.** Запускается программа БИФУНКЦИЯ и вводится **\*.ltp**-файл, текст которого заносится в верхнее окно интерфейса (см. рис. 9.4). Затем на появившейся панели Наблюдаемые элементы вводятся выходной параметр (здесь напряжение  $U(R2)$ ), изменяемый элемент — емкость  $C1$ , и величина его относительного изменения 10 %.

**Шаг 3.** После нажатия на кнопку Формирование ММС в верхнее окно выводятся матрицы и векторы трех ММС (см. рис. 9.5):

- 1) исходной схемы с воздействием  $E1$  и выходным параметром  $U(R2)$ ;
- 2) этой же схемы с тем же воздействием  $E1$  и выходным параметром  $U(C1)$ ;
- 3) измененной схемы с воздействием  $U(C1)$  и выходным параметром  $U(R2)$ .

В нижнее окно выводится полная ММС исходной схемы, которая автоматически записывается в файл с расширением **\*.lmc**. Модификация исходной схемы состоит в замыкании в ней источников напряжения и размыкании источников тока, а также включении последовательно с изменяемым сопротивлением пробного источника напряжения величиной 1 В.



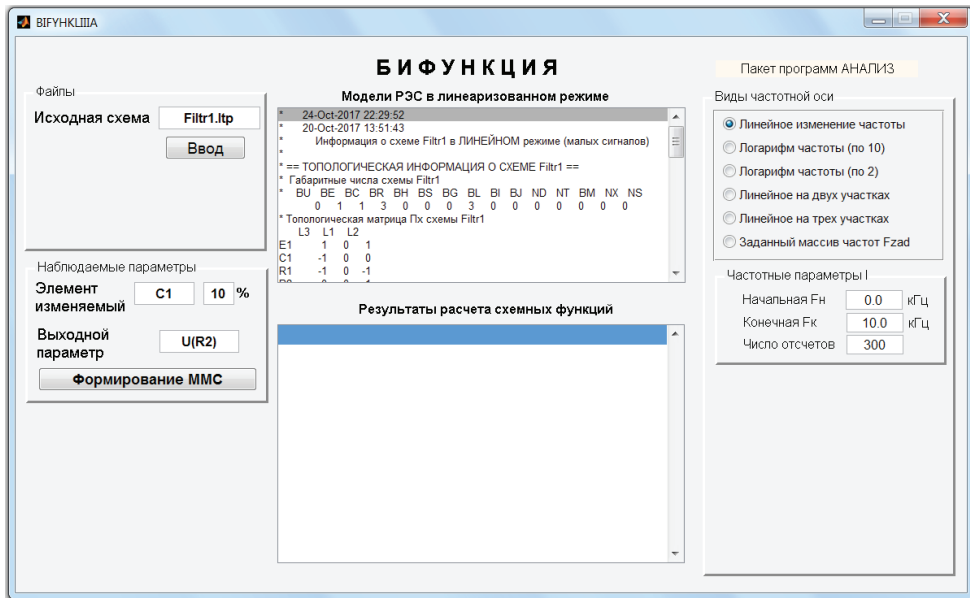


Рис. 9.4. Начальный вид интерфейса программы БИФУНКЦИЯ

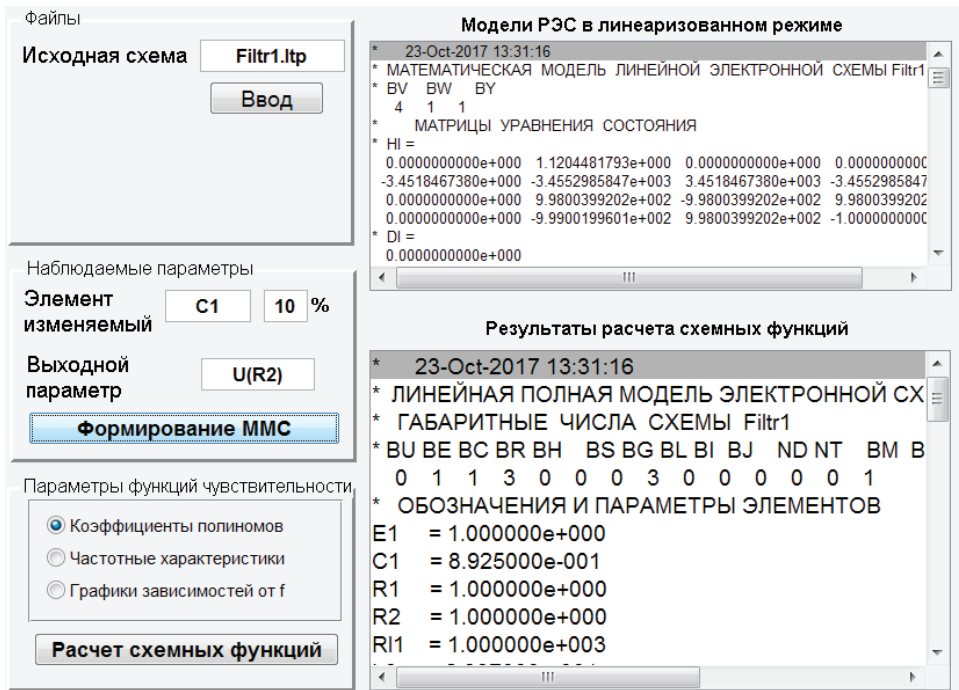


Рис. 9.5. Вывод матриц и векторов MMC после нажатия кнопки Формирование MMC

**Шаг 4.** После того как все математические модели сформированы, проводится расчет параметров частотных зависимостей. Для этого на открывшейся панели **Параметры функций чувствительности** выбирается запрашиваемый параметр, например, коэффициенты полиномов числителя и знаменателя, затем нажимается кнопка **Расчет схемных функций** и в верхнее окно выводятся коэффициенты полиномов числителя и знаменателя схемной функции (рис. 9.6), для которой ищется чувствительность:

$$K_u(p) = \frac{U_{R2}(p)}{U_{E1}(p)} = \frac{T_0(p)}{\lambda(p)}.$$

Также в нижнем окне интерфейса (см. рис. 9.7) появляются искомые коэффициенты полиномов первой  $K_1(p) = \frac{U_{C1}(p)}{U_{E1}(p)} = \frac{T_1(p)}{\lambda(p)}$  и второй  $K_2(p) = \frac{U_{R2}(p)}{U_{C1}(p)} = \frac{T_2(p)}{\lambda(p)}$  частных передаточных, а также их произведение, определяющее относительную чувствительность искомой схемной функции

$$\delta K_u(p) = \frac{dK_u(p)}{dC1/C1} = -K_1(p)K_2(p) = -\frac{T_1(p)T_2(p)}{\lambda^2(p)} = K_{12}(p). \quad (9.8)$$

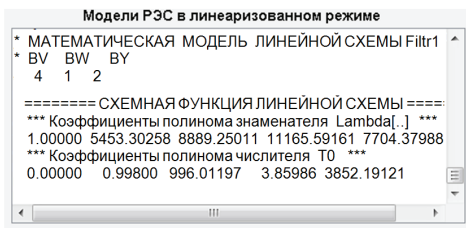


Рис. 9.6. Параметры схемной функции  $K_u(p)$  исходной схемы

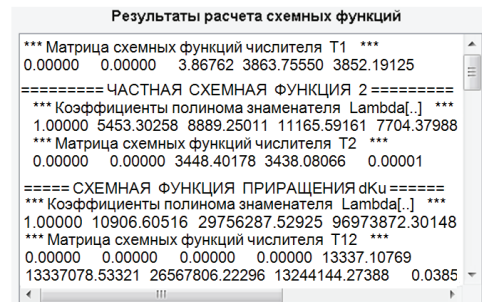


Рис. 9.7. Параметры частных передаточных функций  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_{12}$

Модуль частотной зависимости этой схемной функции строится в первом дополнительном окне, его копия показана на рис. 9.8. Максимальное значение модуля  $|\delta K_u|_{\max} = 0,9567$ , оно соответствует частоте  $f_{\max} = 0,182$  Гц.

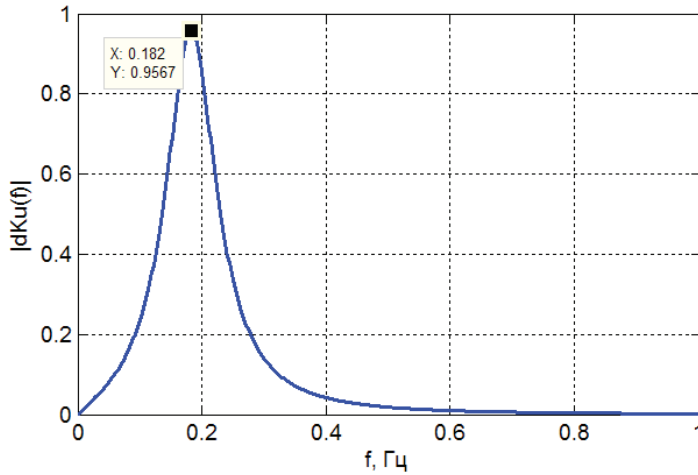


Рис. 9.8. Модуль относительного приращения  $K_{12}(p) = -K_1(p)K_2(p)$

Абсолютные приращения коэффициента передачи при некотором процентном изменении (параметр  $k\%$ ) емкости  $C1$  вычисляются по формуле

$$K_{u\pm}(p) = K_u(p) \pm \frac{k\%}{100\%} \delta K_u(p) = \frac{dK_u(p)}{dC1/C1} / \frac{k\%}{100\%}. \quad (9.9)$$

Модули этих двух комплексно-значных частотных зависимостей представляют собой границы изменения модуля коэффициента передачи  $K_u(p)$  и при заданном 10 %-ном отклонении емкости  $C1$  показаны на рис. 9.10. Расчет дробно-рациональных выражений  $K_{u\pm}(p)$  проводится по формулам ( $k_0 = \frac{k\%}{100\%}$ )

$$K_{u\pm}(p) = \frac{T_0(p)}{\lambda(p)} \mp k_0 \frac{T_1(p)T_2(p)}{\lambda^2(p)} = \frac{\lambda(p)T_0(p) \mp k_0 T_1(p)T_2(p)}{\lambda^2(p)}. \quad (9.10)$$

Частотные зависимости, представленные на рис. 9.8 и рис. 9.9, построены в диапазоне от 0 до 1 Гц, содержат 500 точек, благодаря чему на графиках практически не заметен дискретный характер расчета этих характеристик. Данные для такого расчета задаются на правой панели интерфейса программы БИФУНКЦИЯ.

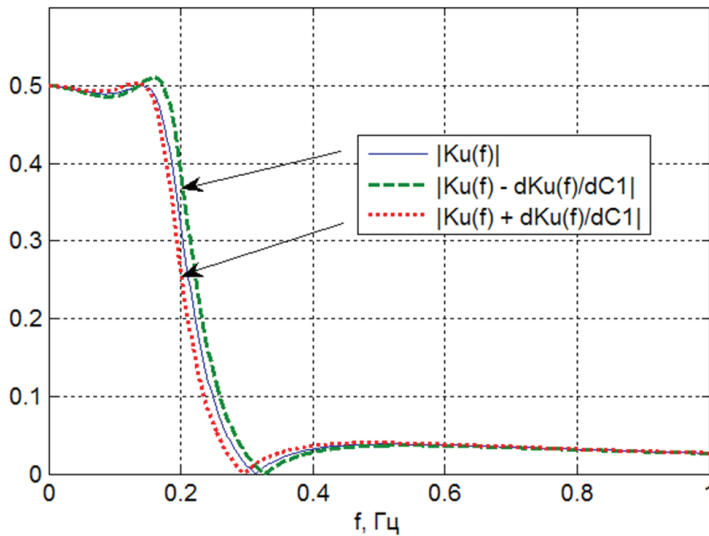


Рис. 9.9. Границы изменения модуля  $K_u(f)$  при 10 %-ном изменении емкости  $C1$

## 9.2. Выполнение индивидуального задания

### Пример 9.1. Анализ чувствительности коэффициента передачи ФНЧ.

Обратимся в качестве примера к уже исследованной выше схеме низкочастотного прототипа фильтра низких частот, схема которого изображена на рис. 9.3.

Задачей индивидуального задания является сравнение результатов расчета чувствительностей коэффициента передачи ФНЧ, выполненных независимо с помощью программ БИФУНКЦИЯ и ФУНКЦИЯ. Пошаговый алгоритм расчета искомой чувствительности по программе БИФУНКЦИЯ был описан выше и здесь не требует пояснений.

**Шаг 1.** Для расчета чувствительности по программе ФУНКЦИЯ согласно структурной схеме (см. рис. 9.1) требуется подготовить два **lst**-файла со списочными моделями двух эквивалентных схем. Первый список (файл **Filtr1.lst**) описывает исходную эквивалентную схему (см. рис. 9.10, *a*, см. также эквивалентную схему на рис. 7.9), и вся подготовительная работа по его формированию была проведена выше в примере 7.1. На основе этого списка (см. рис. 9.11) строится первая частная передаточная функция.

**Шаг 2.** Второй список (файл **Filtr2.lst**) содержит информацию об измененной схеме, для которой строится вторая частная передаточная функция. В исходной схеме (рис. 9.10, *а*) замыкаются независимые источники напряжения и размыкаются независимые источники тока, далее определяется принадлежность изменяемого элемента ребрам или хордам и в зависимости от этого добавляется пробный единичный независимый источник: последовательно с элементом, стоящим в ребре, или параллельно элементу, стоящему в хорде графа исходной схемы. Поскольку в топологической матрице изменяемый элемент — емкость **C1** — входит в число ребер (см. на рис. 9.11, *б* фрагмент списка **Filtr1.lst**), то последовательно с ней ставится пробный источник напряжения в обратной полярности (рис. 9.10, *б*).

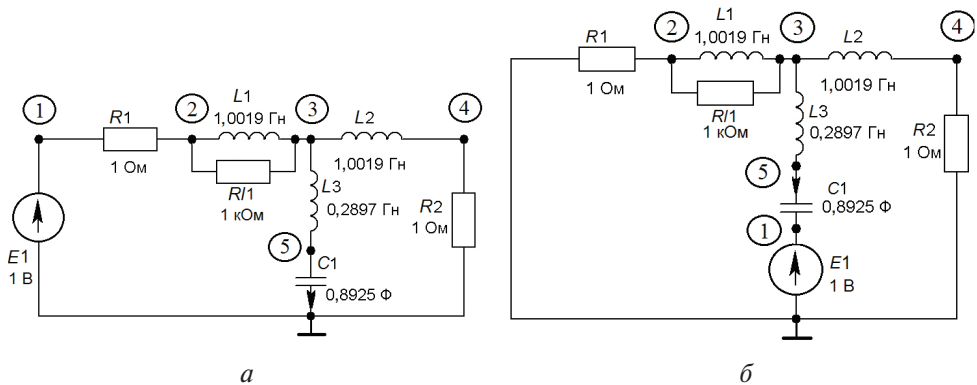


Рис. 9.10. Эквивалентные схемы для формирования первой (*а*) и второй (*б*) частных передаточных функций

*Элем	НУ	КУ	Параметр	* Топологическая матрица Пх схемы			
E1	0	1	1	* Filtr1			
R1	1	2	1				
L1	2	3	1.002				
L2	3	4	1.002				
L3	3	5	0.2897				
C1	5	0	0.8925				
R2	4	0	1				
R11	2	3	1e+003				
				L3	L1	L2	
				E1	1	0	1
				C1	-1	0	0
				R1	-1	0	-1
				R2	0	0	-1
				R11	-1	1	-1

Рис. 9.11. Списочная модель (*а*) и топологическая матрица (*б*) первой частной передаточной функции (стрелкой показана связь от источника управления к изменяемому элементу схемы)

Сравнение списочных моделей обеих эквивалентных схем (см. рис. 9.11, *а* и рис. 9.12, *б*) показывает, что они практически не различаются. Это произошло потому, что исключаемый за счет замыкания исходного источника напряжения  $E1$  узел 1 перенесен во второй схеме в точку соединения емкости  $C1$  и нового пробного источника напряжения. При этом его позиционное обозначение  $E1$  также не изменилось. Итак, если в обеих схемах единственный и одинаковый по типу  $T$  источник напряжения, то обе схемы имеют одинаковое число элементов и узлов, иначе во второй схеме число элементов меньше на величину  $N_E + N_I - 1$  и число узлов меньше на  $N_E - T$  (в исходной схеме  $N_E$  независимых источников напряжения и  $N_I$  источников тока, а параметр  $T = 0$ , если пробный источник во второй схеме — источник тока, иначе  $T = 1$ ).

*Элем	НУ	КУ	Параметр	* Топологическая матрица Пх схемы			
E1	0	1	1	* Filt2			
R1	2	0	1				
L1	2	3	1.002	E1	L3	L1	L2
L2	3	4	1.002	C1	-1	0	0
L3	3	5	0.2897	R1	-1	0	0
C1	5	1	0.8925	R2	1	0	1
R2	4	0	1	R11	0	0	-1
R11	2	3	1e+003		-1	1	-1

*а**б**а**б*

Рис. 9.12. Списочная модель (*а*) и топологическая матрица (*б*) второй частной передаточной функции (стрелкой показана связь от источника управления к изменяемому элементу схемы)

**Шаг 3.** После выполнения первых двух шагов должны быть получены два **ltp**-файла, содержащие всю необходимую топологическую и параметрическую информацию об эквивалентных схемах для получения соответствующих математических моделей. Матрицы уравнений этих моделей формируются на третьем шаге с помощью программы СИСТЕМА (см. на рис. 9.13 фрагменты файлов **Filt1.lmc** и **Filt2.lmc**).

<pre> * МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ Filtr1 * BV BW BY   4 1 2 * МАТРИЦЫ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ * H1 = 0.0000000000e+000 1.1204481793e+000 →   0.0000000000e+000 0.0000000000e+000 -3.4518467380e+000 -3.4552985847e+003 →   3.4518467380e+003 -3.4552985847e+003 0.0000000000e+000 9.9800399202e+002 →   -9.9800399202e+002 9.9800399202e+002 0.0000000000e+000 -9.9900199601e+002 →   9.9800399202e+002 -1.0000000000e+003 * D1 = 0.0000000000e+000 3.4518467380e+000 0.0000000000e+000 9.9800399202e-001  * МАТРИЦЫ УРАВНЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЯ * Hy1 = 1.0000000000e+000 0.0000000000e+000 → 0.0000000000e+000 0.0000000000e+000 * Dy1 = 0.0000000000e+000 * ВЕКТОР УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СХЕМЫ W = E1 * ВЕКТОР НАБЛЮДЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СХЕМЫ Y = U (C1) * ВЕКТОР СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СХЕМЫ V = C1 L3 L1 L2 </pre>	<pre> * МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ Filtr2 * BV BW BY   4 1 2 * МАТРИЦЫ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ * H1 = 0.0000000000e+000 1.1204481793e+000 →   0.0000000000e+000 0.0000000000e+000 -3.4518467380e+000 -3.4552985847e+003 →   3.4518467380e+003 -3.4552985847e+003 0.0000000000e+000 9.9800399202e+002 →   -9.9800399202e+002 9.9800399202e+002 0.0000000000e+000 -9.9900199601e+002 →   9.9800399202e+002 -1.0000000000e+003 * D1 = 0.0000000000e+000 -3.4518467380e+000 0.0000000000e+000 0.0000000000e+000  * МАТРИЦЫ УРАВНЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЯ * Hy1 = 0.0000000000e+000 0.0000000000e+000 → 0.0000000000e+000 1.0000000000e+000 * Dy1 = 0.0000000000e+000 * ВЕКТОР УПРАВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СХЕМЫ W = E1 * ВЕКТОР НАБЛЮДЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СХЕМЫ Y = U (R2) * ВЕКТОР СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНОЙ СХЕМЫ V = C1 L3 L1 L2 </pre>
--	---

Рис. 9.13. Матрицы и векторы математических моделей эквивалентных схем **Filtr1** и **Filtr2**

Из четырех матриц каждой из математических моделей две полностью одинаковы, две различны. Матрицы состояния **H11 = H12 =**

```

0.0000000000e+000 1.1204481793e+000 0.0000000000e+000 0.0000000000e+000
-3.4518467380e+000 -3.4552985847e+003 3.4518467380e+003 -3.4552985847e+003
0.0000000000e+000 9.9800399202e+002 -9.9800399202e+002 9.9800399202e+002
0.0000000000e+000 -9.9900199601e+002 9.9800399202e+002 -1.0000000000e+003

```

совпадают по определению, потому что соответствуют эквивалентным схемам с одинаковой топологической и параметрической информацией. Нулевые матрицы наблюдения **Dy11 = Dy12 = 0.0000000000e+000** одинаково нулевые, поскольку в обеих схе-

мах отсутствует прямая связь между пробными источниками и элементами, на которых наблюдаются напряжения или токи.

**Шаг 4.** На этом шаге с помощью программы **ФУНКЦИЯ** выполняется переход от математической модели линейной схемы во временной области к ее представлению в частотной области. Последовательно для каждой эквивалентной схемы рассчитываются коэффициенты полиномов дробно-рациональных выражений, которые и представляют собой искомые частные передаточные функции. Эти числовые данные сохраняются в файлах **Filtr1.fun** и **Filtr2.fun** (фрагменты см. рис. 9.14). Очевидно, что полиномы **Lambda1** и **Lambda2** знаменателей обеих частных передаточных функций тождественны, различие касается только полиномов их числителей **T1** и **T2**.

<pre> *=== РАСЧЕТ СХЕМНЫХ ФУНКЦИЙ Filtr1 ===  *= РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГОНА АЛГОРИТМА ФАДДЕЕВА =  *** Коэффициенты полинома знаменателя Lambda1 [...] *** 1.05453.30258889.250111165.59167704.3798  *** Матрица схемных функций числителя T1 ** 0.00.03.867623863.755503852.19125 </pre>	<pre> *=== РАСЧЕТ СХЕМНЫХ ФУНКЦИЙ Filtr2 ===  *= РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГОНА АЛГОРИТМА ФАДДЕЕВА =  *** Коэффициенты полинома знаменателя Lambda2 [...] *** 1.05453.30258889.250111165.59167704.3798  *** Матрица схемных функций числителя T2 ** 0.00.03448.401783438.080660.00001 </pre>
--	--

Рис. 9.14. Коэффициенты полиномов числителя и знаменателя частных передаточных функций

**Шаг 5.** По известным частным передаточным функциям по формуле (9.3) рассчитывается искомая относительная чувствительность схемной функции — коэффициента передачи ФНЧ. Скрипт-файл расчета приведен ниже.

```

clear all
Lambda = [1.00000 5453.30258 8889.25011 11165.59161 7704.37988];
T1 = [0.00000 0.00000 3.86762 3863.75550 3852.19125];
T2 = [0.00000 0.00000 3448.40178 3438.08066 0.00001];
T12 = conv (T1, T2);
Lambda2 = conv (Lambda, Lambda);
[K12, w] = freqs (T12, Lambda2, 2*pi* (0:0.002:1));
figure (1), plot (w/2/pi, abs (K12))

```

При использовании этого скрипт-файла для другой схемной функции следует заменить значения элементов массивов **Lambda**,



**T1** и **T2** в начальных строках текста. На графике будет построен модуль (АЧХ) относительной чувствительности коэффициента передачи ФНЧ, аналогичный уже рассчитанному ранее в программе БИФУНКЦИЯ и показанному на рис. 9.8.

**Шаг 6.** Для определения границ отклонений АЧХ фильтра при 10-процентном изменении параметра емкости следует рассчитать коэффициенты полиномов дробно-рационального выражения коэффициента передачи  $K_U(p) = U_2(p) / U_1(p)$ . Для этого пошагово повторяются действия с данными исходной схемы и находится массив **T0** коэффициентов полинома числителя. Далее этот массив подставляется в скрипт-файл, представленный ниже, его команды «рассчитывают» частотные зависимости и «строят» соответствующие графики на одних и тех же координатных осях.

```
T0 = [0.00000 0.99800 996.01197 3.85986 3852.19121];
[K0, w] = freqs (T0, Lambda2,2*pi* (0:0.002:1));
T3p1 = conv (T0, Lambda);
figure (2), plot (w/2/pi, abs (K0))
grid on
hold on
T3p = T3p1+0.1*T12;
T3m = T3p1-0.1*T12;
[K3p, w] = freqs (T3p, Lambda2,2*pi* (0:0.002:1));
plot(w/2/pi, abs (K3p), 'g')
[K3m, w] = freqs (T3m, Lambda2,2*pi* (0:0.002:1));
plot(w/2/pi, abs (K3m), 'r')
hold off
```

Построенный по этим командам тройной график частотных зависимостей полностью совпадает с графиком на рис. 9.9, полученным ранее с помощью программы БИФУНКЦИЯ.

На этом шаге определение относительного коэффициента чувствительности границ отклонений АЧХ заданной схемной функции закончено.

### 9.3. Оформление отчета о выполнении индивидуального задания

---

1. Исходная ПЭСх и заданная схемная функция. Изменяемый элемент схемы и величина его отклонения.
2. Чертеж исходной схемы, выполненный по нормам ЕСКД.
3. Эквивалентная схема исходной ПЭСх и ее списочная модель.
4. Текстовый **fun**-файл исходной схемы с результатами расчетов схемной функции и график ее частотной зависимости.
5. Эквивалентная схема для определения первой частной передаточной функции, ее списочная модель и матрицы математической модели во временной и частотной областях.
6. Текстовый **fun**-файл с результатами расчетов первой частной передаточной схемной функции и график ее частотной зависимости.
7. Эквивалентная схема для определения второй частной передаточной функции, ее списочная модель и матрицы математической модели во временной и частотной областях.
8. Текстовый **fun**-файл с результатами расчетов второй частной передаточной схемной функции и график ее частотной зависимости.
9. Результаты расчетов относительной чувствительности исходной схемной функции и график ее частотной зависимости.
10. Текстовый **bfu**-файл с результатами расчетов чувствительности схемных функций исходной схемы, полученный с помощью программы БИФУНКЦИЯ.
11. Относительный коэффициент чувствительности и границы отклонений модуля исходной частотной зависимости, а также их графики.
12. Результаты сравнения расчетов чувствительности схемных функций исходной схемы двумя методами.
13. Выводы и рекомендации по самостоятельной работе.

## Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение коэффициентов чувствительности линейных схем. Почему эти коэффициенты на самом деле являются не числами, а функциями?
2. Почему математические модели, составленные для определения коэффициентов чувствительности и схемных функций линейных схем, являются однотипными? В чем состоит их сходство и различие?
3. Сформулируйте теорему о равенстве изменения токов в электрической цепи при изменении некоторого сопротивления  $Z$  на величину  $\Delta Z$  и включении дополнительного источника  $\Delta Z I_z(p)$ . Какова роль этой теоремы в построении алгоритма расчета коэффициентов чувствительности линейных схем?
4. Дайте определение частной передаточной функции в линейной схеме. Какие входные и выходные параметры она связывает?
5. В какой последовательности и при каких условиях выполняется расчет частных передаточных функций при определении чувствительности схемной функции?
6. Согласно методу частных передаточных функций все коэффициенты чувствительности  $\frac{dK_u(p)}{dZ_i(p)}$  в линейной схеме имеют одинаковый знаменатель. Каким образом он связан со знаменателями схемных функций  $K(p)$  этой схемы?
7. Определите матрицы  $H_l$ ,  $D_l$ ,  $H_{ul}$ ,  $D_{ul}$  математической модели схемы частотного фильтра (см. рис. 9.15) для расчета схемной функции — коэффициента передачи по напряжению  $K_u(p) = U_{Rn}(p) / U_{E1}(p)$ . Также с помощью учебных программ СХЕМА и СИСТЕМА вычислите матрицы для формирования обеих частных передаточных функций для расчета коэффициента чувствительности  $\frac{dK_u(p)}{dR_1}$ . Некоторые из них приведены ниже для проверки правильности расчетов.

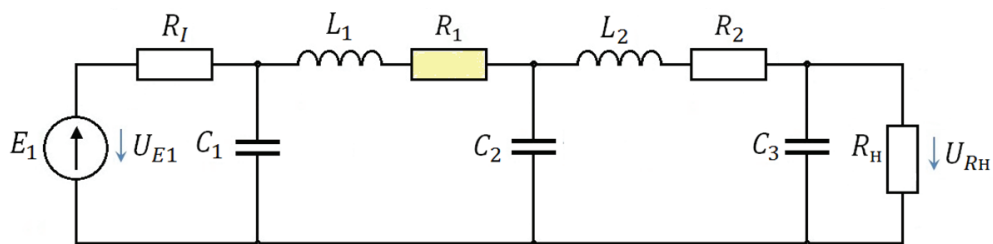


Рис. 9.15. Эквивалентная схема линейного фильтра

$$H_{\text{л}} = H_{\text{л1}} = H_{\text{л2}} = \begin{bmatrix} -1/20 & 0 & 0 & -1/20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/4 & -1/4 \\ 0 & 0 & -1/30 & 0 & 1/6 \\ 10/3 & -10/3 & 0 & -10 & 0 \\ 0 & 2 & -2 & 0 & 10 \end{bmatrix}, D_{\text{л}} = D_{\text{л1}} = \begin{bmatrix} 1/2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$D_{\text{л2}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 10/3 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$H_{\text{ул}} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0], D_{\text{ул}} = [0], \quad H_{\text{ул1}} = [0 \ 0 \ 0 \ 3 \ 0], D_{\text{ул1}} = [0],$$

$$H_{\text{ул2}} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0], \quad D_{\text{ул2}} = [0].$$

8. Что означают графические образы «трубок» для модуля и фазы заданных схемных функций, каким образом они рассчитываются и представляются в программе БИФУНКЦИЯ?

## 10. Статистический анализ электронных схем

Перед выполнением восемнадцатого варианта индивидуального задания по самостоятельной работе необходимо изучить процедуры статистического моделирования, а также методы формирования математических моделей в статическом режиме и вычислительные методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений (СНЛАУ). Студенту следует ознакомиться со структурой алгоритма статистического моделирования (рис. 10.1), рассмотреть примеры численного решения задач анализа электронных схем по постоянному току.

Для программы СТАТИСТИКА сначала нужно подготовить входную информацию об электронной схеме — текстовый файл **\*.lst**. Далее с помощью программы СХЕМА необходимо преобразовать исходную схему в эквивалентную схему в статическом режиме, состоящую только из двухполюсников (см. рис. 10.2). Текстовый **lst**-файл с описанием эквивалентной схемы является входным для программы СТАТИСТИКА. Дополнительно следует определить начальное приближение для вектора аргументов нелинейностей **No** и абсолютную погрешность **Eps** решения математической модели (системы нелинейных алгебраических уравнений). При подготовке входной информации учесть следующее:

а) в исходной электронной схеме из активных элементов должны быть только полупроводниковые диоды и биполярные транзисторы;



Рис. 10.1. Обобщенный алгоритм статистического моделирования электронных схем

б) при удалении емкостей схема не должна распадаться на несколько независимых подсхем;

в) все действия по созданию входного для программы СТАТИСТИКА файла с расширением **\*.lst** выполнять с помощью программы СХЕМА и в дальнейшем его не редактировать.

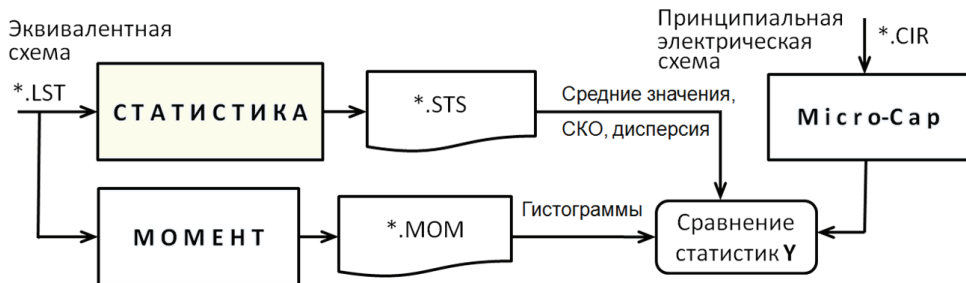


Рис. 10.2. Связи между программами определения статистических характеристик схемы

## 10.1. Интерфейс программы СТАТИСТИКА

Интерфейс программы СТАТИСТИКА (см. рис. 10.3) мало отличается от интерфейсов предыдущих программ СХЕМА и СИСТЕМА. Он также содержит четыре панели и два окна для показа многострокового текста.

Главной панелью интерфейса является панель **Параметры моделирования** для задания значений параметров статистического моделирования математической модели схемы, представляемой здесь системой нелинейных алгебраических уравнений. Выбор результатов статистического моделирования проводится с помощью нижней правой панели **Статистика схемы**. На верхней правой панели **Параметры моделей компонентов** можно задавать параметры моделей Эберса-Молла биполярных транзисторов и полупроводниковых диодов. Панель **Файлы** предназначена, как и в ранее представленных интерфейсах, для чтения и записи информационных файлов.

После ввода **lst**-файла с топологической и параметрической информацией о схеме в верхнем окне интерфейса появляется текст этого файла и на панели становится видимой кнопка **Формирование ММС** (см. рис. 10.4). Возможно редактирование текста списочной модели

в статическом режиме. Эта модель может быть записана в выходной текстовый **sts**-файл.

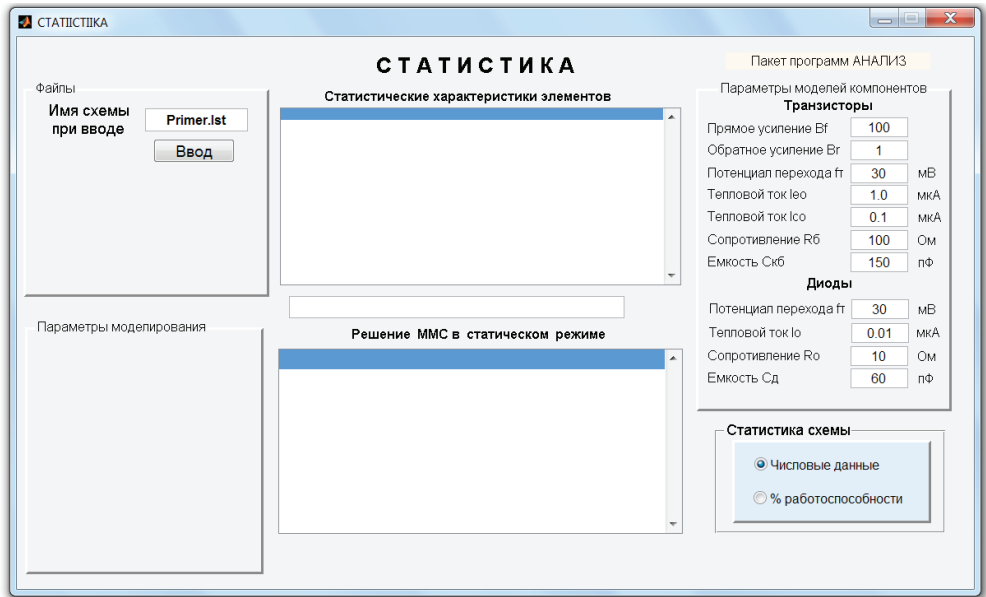


Рис. 10.3. Начальное состояние интерфейса программы СТАТИСТИКА

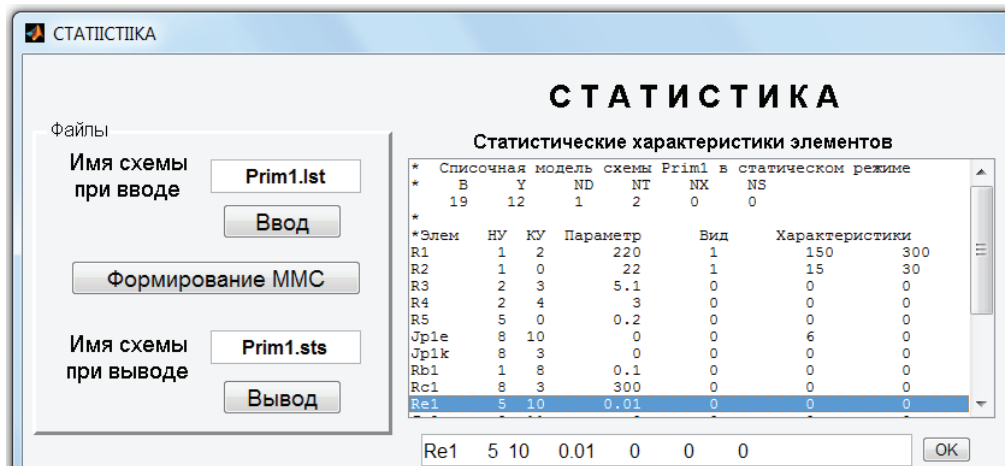


Рис. 10.4. Списочная модель схемы в статическом режиме в верхнем окне интерфейса

Прежде чем нажимать кнопку **Формирование ММС**, необходимо задать состав и значения случайных отклонений параметров сопро-

тивлений схемы. Для этого в списочной модели верхнего окна интерфейса следует определить вид распределения (целое число **PrR**) и два его параметра (вещественные числа **Vr (1)** и **Vr (2)**). В программе СТАТИСТИКА имеется возможность выбрать одно из трех распределений: равномерное (**PrR = 1**), нормальное (**PrR = 2**) и экспоненциальное (**PrR = 3**), формирование случайного значения параметра сопротивления выполняется по формулам, приведенным в табл. 10.1. В качестве источников случайных чисел используется датчик равномерно распределенных чисел на интервале (0,1) **rand** и датчик нормально распределенных чисел **randn** с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Таблица 10.1

Задание случайного параметра сопротивления R

Вид <b>PrR</b>	Характеристики		Закон распределения
	Первая	Вторая	
1	<b>Vr (1)</b>	<b>Vr (2)</b>	$R = Vr(1) + (Vr(2) - Vr(1)) * rand$
2	<b>Vr (1)</b>	<b>Vr (2)</b>	$R = Vr(1) + Vr(2) * randn$
3	<b>Vr (1)</b>	<b>Vr (2)</b>	$R = Vr(1) - \log(rand) * Vr(2)$

Например, на рис. 10.4 для двух сопротивлений **R1** и **R2** выбраны равномерные законы распределения параметров: сопротивление **R1** может иметь случайное значение параметра в диапазоне от 150 до 300 кОм, сопротивление **R2** — в диапазоне от 15 до 30 кОм.

Нажатие кнопки **Формирование ММС** запускает процесс формирования топологических и параметрических матриц и последующий расчет статической матрицы **Enn** и вектора влияния **Nw**, т. е. формирование математической модели схемы в статическом режиме в номинальном режиме (без отклонений каких-либо параметров элементов схемы). Численные значения матрицы **Enn** и вектора **Nw** отображаются также в верхнем окне. Относительно этой математической модели в дальнейшем вычисляются случайные отклонения и тем самым определяются статистические характеристики схемы.

Для получения численных значений токов и напряжений схемы в номинальном режиме следует нажать кнопку **Решение исходной ММС**, которая появляется в нижней части интерфейса (см. рис. 10.5). Система нелинейных уравнений решается методом Ньютона-Рафсона при вариации напряжения питания. В окне отображаются токи, напряжения и мощности *p-n*-переходов моделей диодов и транзисторов



(электрические параметры рабочих точек), сопротивлений и проводимостей, а также результаты проверки баланса мощностей.

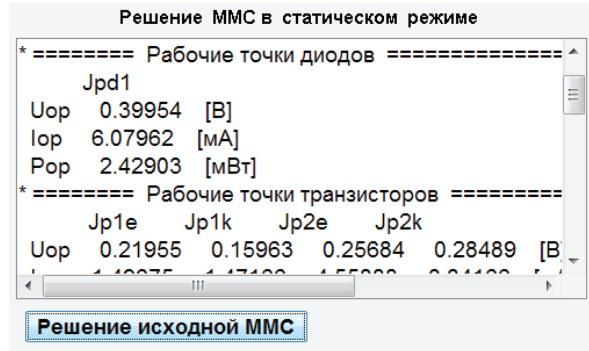


Рис. 10.5. Результат обработки кнопки Решение исходной ММС

После того как получены результаты расчетов в номинальном режиме, на панели **Параметры моделирования** появляется возможность задать элементы выходного вектора, относительно которых должно проводиться статистическое моделирование. По умолчанию число испытаний равно 100 (обозначено как **Число расчетов**), но может быть установлено и другим, как показано, например, на рис. 10.6.

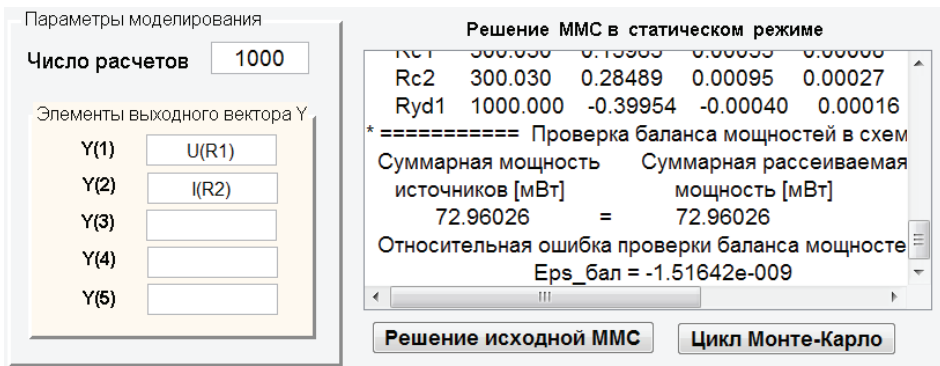


Рис. 10.6. Результат обработки кнопки Решение исходной ММС

Параметры метода вариации по напряжению питания могут быть изменены при включении отметки на правой нижней панели (рис. 10.6). Кроме того, на каждой вариации число итераций по поиску решения нелинейной системы ограничивается величиной, равной 15 по умолчанию. Эта величина может быть изменена, чаще в большую сторону.

Возникающее в конце решения ММС модальное окно содержит информацию о точности решения и служит своего рода признаком правильности вычислительного процесса. При правильном решении на нем отображается норма вектора приращения, меньшая заданной величины **Eps**. Окно убирается с экрана обычным способом.

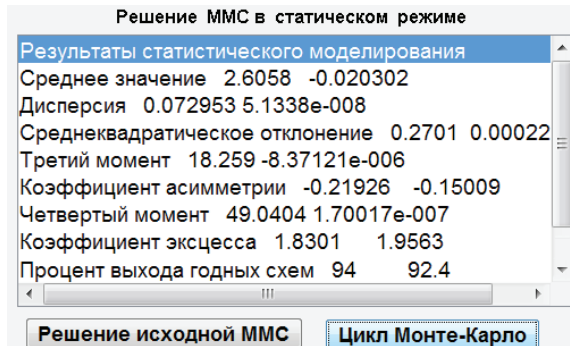


Рис. 10.7. Результаты статистического моделирования схемы по постоянному току

Содержание верхнего (ММС в статическом режиме) и нижнего (результаты определения напряжений и токов в статике) окон следует сохранить, нажав кнопку **Вывод** на верхней панели **Файлы**.

Процесс статистического моделирования заканчивается построением гистограмм распределений заданных электрических параметров. На рис. 10.8 эти гистограммы построены при использовании равномерных законов распределения параметров изменяемых элементов схемы. Судя по гистограммам, вид распределений наблюдаемых величин  $U(R1)$  и  $I(R2)$  далек от равномерного закона.

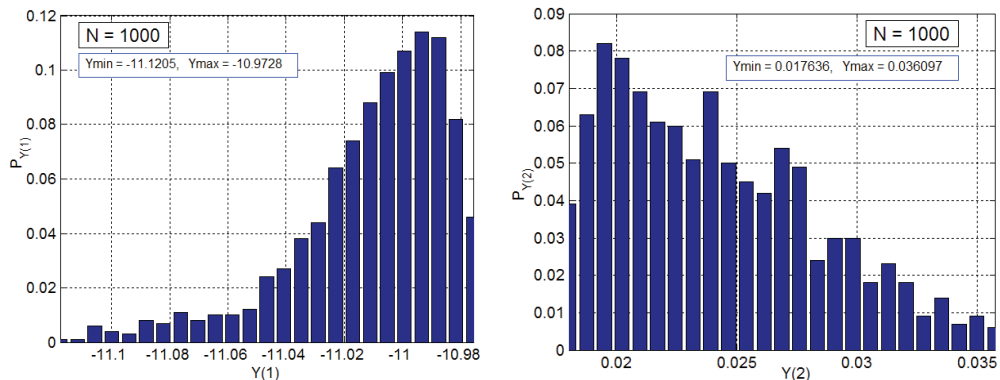


Рис. 10.8. Гистограммы распределений  $Y(1) = U(R1)$  и  $Y(2) = I(R2)$

## 10.2. Выполнение индивидуального задания

Рассмотрим пример выполнения индивидуального задания № 18 (см. п. 1.1), в котором требуется определить основные статистические характеристики двух электрических параметров исходной схемы: падения напряжения  $U_{R1}$  на сопротивлении  $R1$  и тока  $I_{R2}$  через сопротивление  $R2$  (см. рис. 10.9) в режиме по постоянному току. К статистическим характеристикам относятся первые четыре абсолютных статистических момента двух искомых распределений, а также их коэффициенты асимметрии и эксцесса. Кроме того, также требуется определить процент выхода годных схем, удовлетворяющих критерию

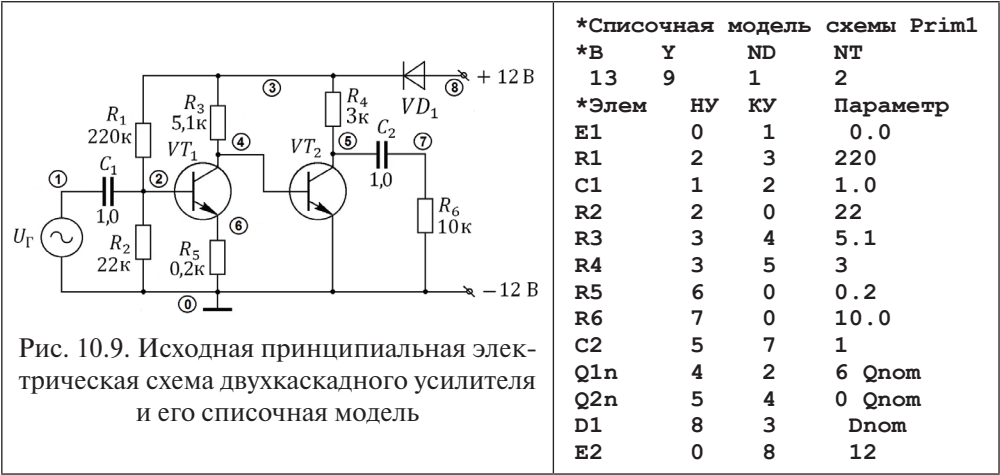
$$\begin{aligned} U_{R1\text{ ср}} - 3\sigma_{R1} < U_{R1} < U_{R1\text{ ср}} + 3\sigma_{R1}, \\ I_{R2\text{ ср}} - 3\sigma_{R2} < I_{R2} < I_{R2\text{ ср}} + 3\sigma_{R2}, \end{aligned} \quad (10.1)$$

где  $U_{R1\text{ ср}}$ ,  $\sigma_{R1}$ ,  $I_{R2\text{ ср}}$  и  $\sigma_{R2}$  — средние значения и среднеквадратичные отклонения (СКО) напряжения  $U_{R1}$  и тока  $I_{R2}$  соответственно. Величина разброса значений этих элементов составляет 20 %, следует рассмотреть два закона распределения — равномерный и нормальный.

Ниже приведен пример, показывающий применение программы СТАТИСТИКА для расчета искомых статистических характеристик.

**Пример 10.1.** Исходная схема **Prim1** приведена на рис. 10.9, здесь же показан список ее элементов с указанием узлов, подготовленный программой СХЕМА.

В схеме один полупроводниковый диод и два транзистора проводимости **npn**. В эквивалентной схеме (**stp**-файл) имеются два источника напряжения и 6 сопротивлений. Параметры элементов указаны в масштабе: вольт, килоом, миллиампер.



**Шаг 1.** Сначала определяются значения отклонений от номиналов исследуемых элементов по нормальному закону. На рис. 10.10 показана гауссова колоколообразная кривая, моделирующая распределение значений сопротивления  $R2$  с номинальным значением 22 кОм и СКО, равным 1,67 кОм. Среднеквадратичное отклонение рассчитывается по формуле, следующей из заданного разброса 20% от  $R2_{\text{ном}}$ , которое должно быть приравнено  $3\sigma_{R2}$ :

$$\sigma_{R2} = 0,2R2_{\text{ном}} / 3 = 1,67.$$

(10.2)

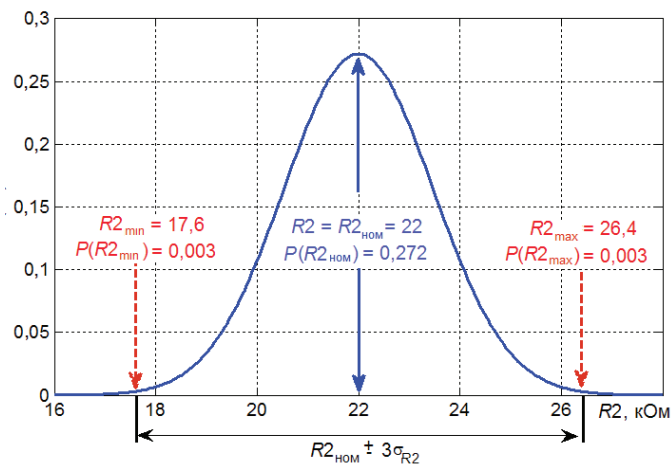


Рис. 10.10. Пояснения к расчету граничных значений отклонений при нормальном законе распределения параметра сопротивления  $R2$

Минимальное случайное значение сопротивления  $R_2$  равно 17,6 кОм, максимальное случайное значение — 26,4 кОм. Эти значения можно использовать при определении границ равномерного распределения.

**Шаг 2.** В программе СТАТИКА выполняется расчет статического режима схемы при номинальных значениях параметров элементов (см. рис. 10.11). Параметры инжекционных моделей транзисторов программы СТАТИКА приняты по умолчанию:

<b>Br</b> — коэффициент прямого усиления по схеме с ОЭ	100;
<b>Bf</b> — коэффициент обратного усиления по схеме с ОЭ	1;
<b>mft</b> — температурный потенциал обоих переходов	0.030 В;
<b>Ieo</b> — обратный тепловой ток перехода Э-Б	1Е-6 мА;
<b>Iko</b> — обратный тепловой ток перехода К-Б	1Е-4 мА;
<b>Rb</b> — омическое сопротивление базы и модели диода	100 Ом;
<b>mft</b> — температурный потенциал <i>pn</i> -перехода	0.030 В;
<b>Io</b> — обратный тепловой ток <i>pn</i> -перехода	1е-7 мА;
<b>Ro</b> — омическое сопротивление <i>pn</i> -перехода	10 Ом.

При выборе этих параметров следует учесть известные ограничения:  $Br > 0$ ;  $Bf > 0$ ;  $0.01 < mft < 0.1$ ;  $1e-12 < Io, Ieo, Iko < 1e-3$ .

Интересующие в задании фрагменты результатов расчета приведены на рис. 10.11.

Номинальные значения электрических параметров изменяемых элементов схемы равны:  $U_{R1\text{ ном}} = -11,051$  В,  $I_{R2\text{ ном}} = 0,0236$  мА. К ним должны быть близки искомые средние значения электрических параметров  $U_{R1\text{ ср}}$  и  $I_{R2\text{ ср}}$  после статистического моделирования.

**Шаг 3.** Запускается программа СТАТИСТИКА и вводится **1st**-файл со списочной моделью схемы. В примере это файл **Prim1.1st**, содержимое которого отображается в верхнем окне интерфейса программы. Списочная модель дополняется данными, определяющими тип и параметры законов распределений изменяемых элементов схемы (см. рис. 10.12), которые были рассчитаны на шаге 1.

**Шаг 4.** После нажатия кнопки **Формирование ММС** в верхнее окно интерфейса (в дополнение к списочной модели) выводятся статическая матрица **Enn** и вектор влияния **Nw** математической модели схемы. Следует сравнить математические модели (матрицу **Enn** и вектор **Nw**), сформированные в программах СТАТИКА и СТАТИСТИКА. В случае их несовпадения в младших цифрах значений (см. рис. 10.13) найти причину и, при возможности, попытаться ее устранить.

```

* МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОННОЙ СХЕМЫ Prim1M В СТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ
* Габаритные числа схемы Prim1M
*   BU  BE  BR  BG  BI  BJ  ND  NT
*   0   1  10   3   0   5   1   2
*   Статическая матрица  схемы Prim1M  Enn =
-130.3085372634    19.1550743107   -109.3215846713    128.4770207617   -1.8090790629
   19.1550743107   -21.8480999930    -2.4421052141   -19.1959866972    -0.0404125263
-109.3215846713    -2.4421052141   -114.8597294688    112.4170114678     3.0642408443
  128.4770207617   -19.1959866972    112.4170114678   -131.6823656133    -3.1630748808
   -1.8090790629   -0.0404125263     3.0642408443    -3.1630748808    -7.8932384973
*   Вектор влияния независимых источников  Nw =
  10.4362975528     0.2298608917    -1.3118590161     1.5417242491    -0.0217089488
*   Вектор начального приближения аргументов нелинейностей  No =
    0         0         0         0         0
*   Допустимая абсолютная норма ошибки решения ММС Eps =
0.0001

%   * ===== Электрические данные сопротивлений ребер =====
% Позиционное   Параметр   Напряжение   Ток   Рассеиваемая
% обозначение   [кОм]      [В]        [мА]   мощность [мВт]
Rod1    0.005    0.03050    6.10099    0.18611
Re1     0.010    -0.01423   -1.42295    0.02025
Re2     0.010    -0.04654   -4.65448    0.21664
Rb1     0.060    0.00160    0.02667    0.00004
Rb2     0.060    0.04819    0.80318    0.03871
R5      0.200    0.28459    1.42295    0.40496
R4      3.000    11.55389    3.85130    44.49744
R3      5.100    11.21727    2.19947    24.67200
R2     22.000    0.51850    0.02357    0.01222 ← Изменяемый элемент
R1     220.000   -11.05135   -0.05023    0.55515 ← Изменяемый элемент
%   * ===== Электрические данные проводимостей хорд =====
% Позиционное   Параметр   Напряжение   Ток   Рассеиваемая
% обозначение   [кОм]      [В]        [мА]   мощность [мВт]
Rc1     300.030    0.16432    0.00055    0.00009
Rc2     300.030    0.28843    0.00096    0.00028
Ryd1    1000.000    0.39964    0.00040    0.00016

```

Рис. 10.11. Результаты анализа электронной схемы **Prim1** по постоянному току

Файлы

Имя схемы при вводе

Prim1.lst

Ввод

Имя схемы при выводе

Prim1.sts

Вывод

Формирование ММС

Статистические характеристики элементов

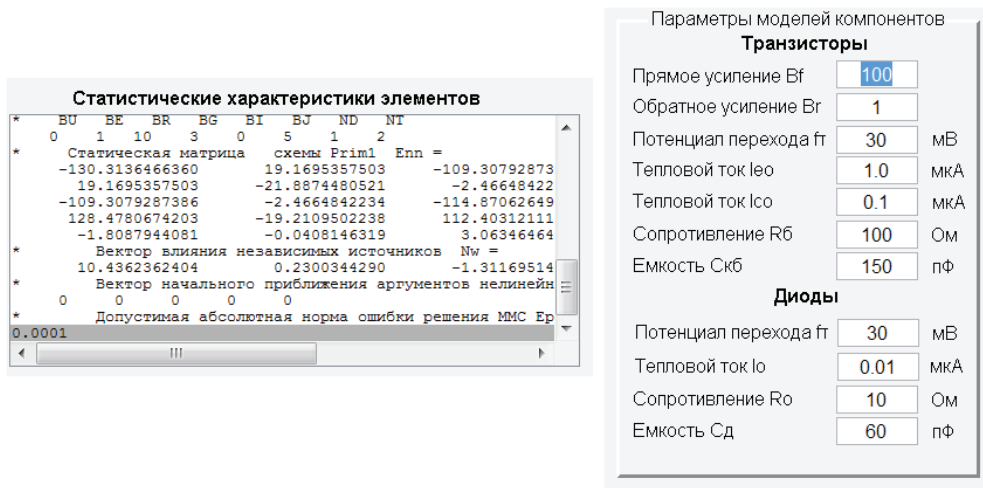
\* Списочная модель схемы Prim1 в статическом режиме
\* B Y ND NT NX NS
\* 19 12 1 2 0 0

*Элем	NU	KV	Параметр	Вид	Характеристики	
R1	1	2	220	2	220	16.7
R2	1	0	22	2	22	1.67
R3	2	3	5.1	0	0	0
R4	2	4	3	0	0	0
R5	5	0	0.2	0	0	0
Jple	8	10	0	0	6	0
Jplk	8	3	0	0	0	0
Rb1	1	8	0.1	0	0	0
Rc1	8	3	300	0	0	0
Re1	5	10	0.01	0	0	0

R2 1 0 22 2 22 1.67

OK

Рис. 10.12. Ввод списочной модели и заданий параметров законов распределений



а

б

Рис. 10.13. Математическая модель схемы (а)  
и параметры моделей активных элементов схемы (б)

**Шаг 5.** На этом шаге выполняется расчет схемы по постоянному току при номинальных значениях параметров. Нажимается клавиша **Решение** исходной ММС, расположенная внизу интерфейса, и в его нижнее окно выводятся результаты расчета, часть которых представлена ниже.

```
% * ===== Рабочие точки диодов =====
                Jpd1
Uop      0.39954      [В]
Iop      6.07962      [мА]
Pop      2.42903      [мВт]
% * ===== Рабочие точки транзисторов =====
                Jp1e      Jp1k      Jp2e      Jp2k
Uop      0.21955      0.15963      0.25684      0.28489      [В]
Iop      1.49675      -1.47166      4.55888      -3.84166      [мА]
Pop      0.32862      -0.23492      1.17090      -1.09445      [мВт]

% Позиционное      Параметр      Напряжение      Ток      Рассеиваемая
% обозначение      [кОм]      [В]      [мА]      мощность [мВт]
R2      22.000      0.53644      0.02438      0.01308
R1      220.000      -11.00322      -0.05001      0.55032

% * ===== Проверка баланса мощностей в схеме =====
% Суммарная мощность      Суммарная рассеиваемая
% источников [мВт]      мощность [мВт]
      -72.96026      =      72.96026

% Относительная ошибка проверки баланса мощностей
Eps_бал = -1.51642e-009
```

Важным результатом расчета является вектор начального приближения, составленный из напряжений на  $p$ - $n$ -переходах диода и транзисторов:

$$\mathbf{N}_0 = [\mathbf{U}_{0p} \text{ (диода)} \ \mathbf{U}_{0p} \text{ (транзисторов)}] = \\ = [0.39954 \quad 0.21955 \quad 0.15963 \quad 0.25684 \quad 0.28489].$$

Этот вектор является одинаковым начальным приближением для всех вариантов статистических расчетов, что существенно сокращает вычислительные затраты.

**Шаг 6.** Перед запуском статистического моделирования задаются:

1) на панели **Элементы выходного вектора** — вектор выходных электрических параметров согласно индивидуальному заданию;

2) при необходимости расчета процента годных схем — параметры двусторонних границ (рис. 10.14). На панели **Статистика схемы** выбирается радиокнопка **% работоспособности**, появляется слева дополнительная панель **Границы работоспособности**, на которой вводятся минимальная и максимальная границы отклонений исследуемых электрических параметров. Границы задаются в долях соответствующих среднеквадратичных отклонений.

Рис. 10.14. Задание границ для определения процентов работоспособности

При нажатии на радиокнопку **Числовые данные** дополнительная панель исчезает.

**Шаг 7.** Запуск статистического моделирования происходит при нажатии кнопки **Цикл Монте–Карло**. Перед запуском нужно задать число испытаний (циклов), обычно от нескольких сотен до нескольких тысяч. По результатам моделирования в рабочем пространстве появляется выходная структура **Ystats**, содержимое которой дублирует вывод статистик в нижнее окно (см. рис. 10.15).



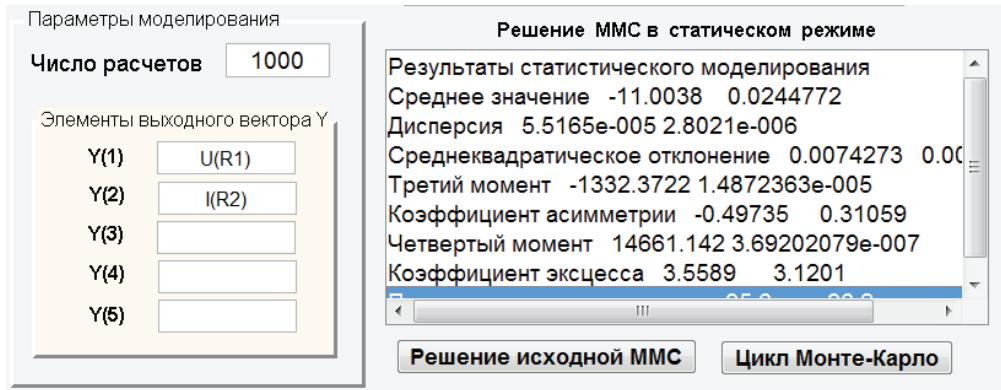


Рис. 10.15. Результаты статистического моделирования

Структура **Ystats** содержит все необходимые числовые данные, позволяющие сделать однозначные выводы о результатах статистического моделирования (рис. 10.16). Кроме того, в файле **Prim1.sts** пошагово и более подробно сохраняется информация о результатах выполнения всех операций пользователя программы СТАТИСТИКА.

Ystats <1x1 struct>	
Field ^	Value
MMCo	<6x5 double>
No	[0.3995;0.2196;0.1596;0.2568;0.2849]
So	[6.0796;1.4968;-1.4717;4.5589;-3.8417]
Grmin	[-2,-11.0186,0.0211]
Grmax	[2,-10.9889,0.0278]
Y	<2x1000 double>
ResStat1	'Результаты статистического моделирования'
ResStat2	'Среднее значение -11.0038 0.0244772'
ResStat3	'Дисперсия 5.5165e-005 2.8021e-006'
ResStat4	'Среднеквадратическое отклонение 0.0074273 0.0016739'
ResStat5	'Третий момент -1332.3722 1.4872363e-005'
ResStat6	'Коэффициент асимметрии -0.49735 0.31059'
ResStat7	'Четвертый момент 14661.142 3.69202079e-007'
ResStat8	'Коэффициент эксцесса 3.5589 3.1201'
ResStat9	'Процент выхода годных схем 95.6 96.2'

Рис. 10.16. Содержимое полей структуры **Ystats**

Процесс показа результатов статистического моделирования заканчивается построением гистограмм распределений наблюдаемых электрических величин (см. рис. 10.17).

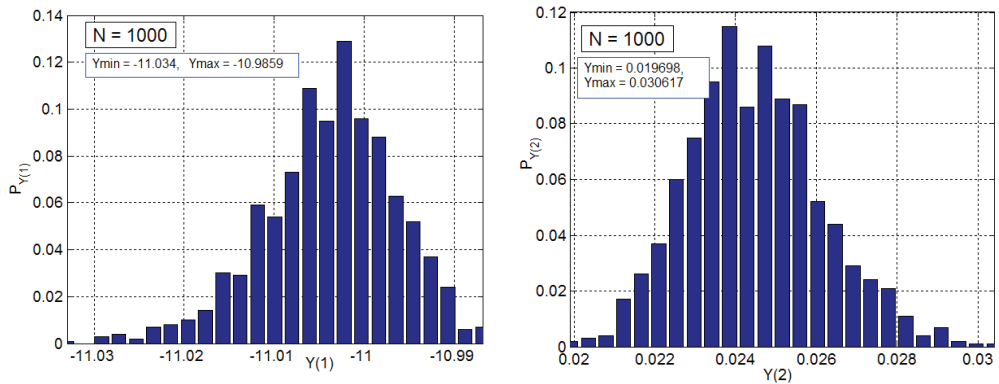


Рис. 10.17. Гистограммы распределений  $Y(1) = U(R1)$  и  $Y(2) = I(R2)$

Студенту предлагается сравнить гистограммы итоговых распределений при задании нормальных законов распределения параметров элементов (рис. 10.17) и равномерных законов распределения параметров (см. рис. 10.8) одинаковых радиоэлементов **R1** и **R2**.

### 10.3. Оформление отчета о выполнении индивидуального задания

1. Исходная ПЭСх. Чертеж схемы, выполненный по нормам ЕСКД.
2. Содержание текстового файла со списочной моделью ПЭСх.
3. Содержание задания на статистическое моделирование, расчеты параметров законов распределения и границ работоспособности.
4. Сведения о параметрах номинального режима по постоянному току.
5. Результаты статистического моделирования в виде числовых значений, таблиц и гистограмм.
6. Подробный анализ устойчивости схемы к случайным отклонениям параметров заданных элементов.
7. Выводы и рекомендации по самостоятельной работе.

---

**Контрольные вопросы и задания**

---

1. В чем состоит суть методов Монте–Карло и какие три задачи при использовании этих методов для статистического анализа электронных схем должен решить инженер?
2. Дайте определение доверительной вероятности и доверительного интервала. Почему в статистических расчетах любой результат должен сопровождаться интервальными оценками?
3. Что такое «правило трех сигм» и каким образом оно связано с доверительными вероятностями, доверительными интервалами и квантилями нормального распределения?
4. Грубое определение числа  $N$  одинаковых расчетов электронной схемы проводится по неравенству Чебышева

$$\Pr\left\{\left|\hat{p} - p\right| > \Delta_p\right\} < \sigma_p^2 / \Delta_p^2.$$

Каким образом из этого неравенства можно получить соотношение для величины  $N$ ?

5. Найдите верхнюю границу числа  $N$  одинаковых расчетов схемы для доверительной вероятности  $P_d = 0,95$  и возможной ошибке  $\Delta_p = 0,01$  в определении вероятности.
6. В статистических расчетах используются среднее значение  $\hat{m}$  и выборочная дисперсия  $\hat{\sigma}^2$ . По какой формуле можно вычислять текущие значения этих статистик в процессе статистического накопления?
7. Какое место в алгоритме статистического моделирования электронных схем занимает одновариантный анализ этих схем? Что изменяется в математической модели схемы при ее очередном формировании и последующем решении?
8. Дайте определение псевдослучайного числа, сгенерированного компьютером. Какие требования предъявляются к статистическим характеристикам таких чисел?
9. По каким алгоритмам генерируются на ЭВМ псевдослучайные числа? Назовите основные характеристики этих алгоритмов.
10. Назовите широко используемые в статистическом моделировании процедуры перехода от равномерно распределенных чисел (РРЧ) к нормально распределенным числам (НРЧ). Какая из них дает возможность из двух РРЧ получить два НРЧ?

11. Как можно использовать метод обратной функции распределения для получения на компьютере псевдослучайных чисел с нетиповыми статистическими законами?
12. Какие статистические характеристики электронной схемы можно определить с помощью программы СТАТИСТИКА? Как нужно задать входные параметры программы, чтобы рассчитать процент выхода годных схем при нормальном распределении параметров ее компонентов?
13. Что изменится в блок-схеме программы СТАТИСТИКА (см. рис. 10.1) при смене режима работы электронной схемы, например, вместо анализируемого в этой программе режима по постоянному току нужно определять статистические характеристики схемы в динамическом режиме?

## Библиографический список

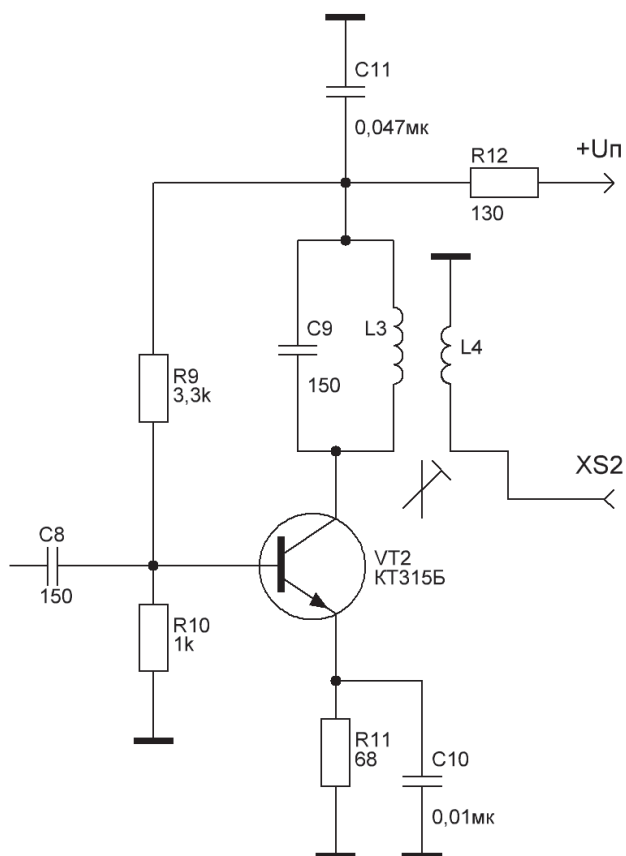
---

1. Трухин М. П. Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств: учебное пособие для вузов / М. П. Трухин. Москва : Горячая линия — Телеком, 2015. 396 с.
2. Разевиг В. Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap7 / В. Д. Разевиг. Москва : Горячая линия — Телеком, 2003. 368 с.
3. Влах И. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем : пер. с англ. / И. Влах, К. Сингхал. Москва : Радио и связь, 1988. 560 с.
4. Дьяконов В. П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров / В. П. Дьяконов. Москва : ДМК Пресс, 2011. 976 с.
5. Попов В. П. Основы теории цепей : учебник для вузов / В. П. Попов. Москва : Высшая школа, 2000. 574 с.

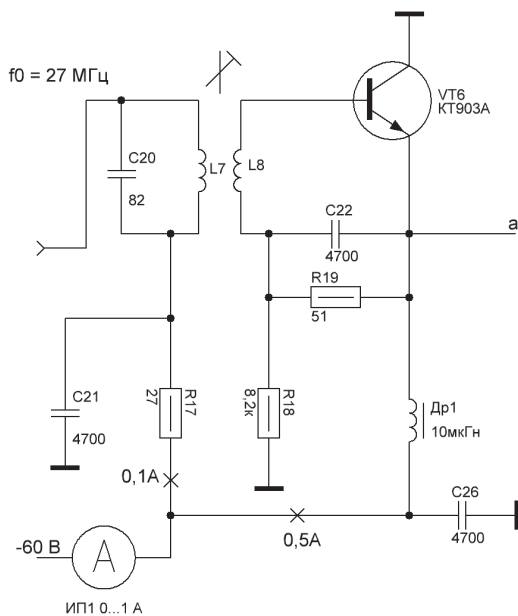
# Приложение 1

## Варианты принципиальных электрических схем для выполнения самостоятельной работы

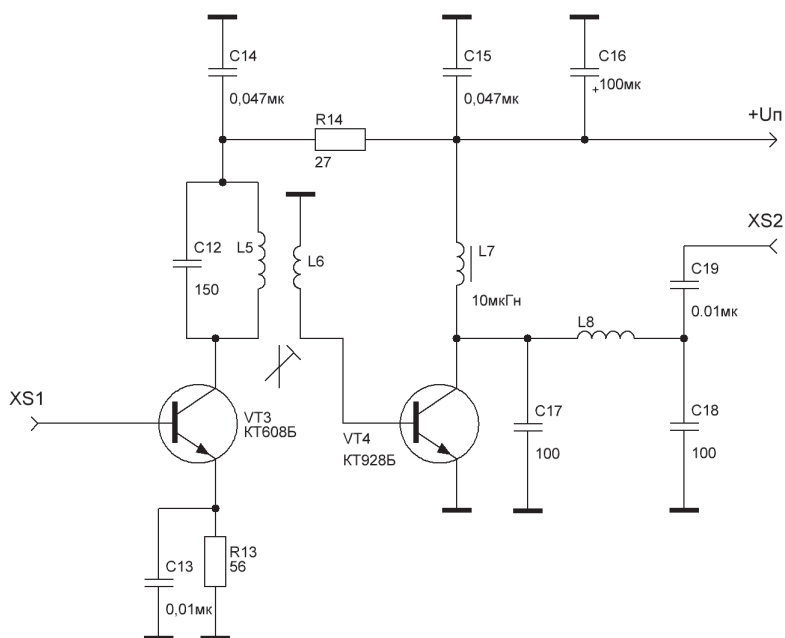
Вариант 1



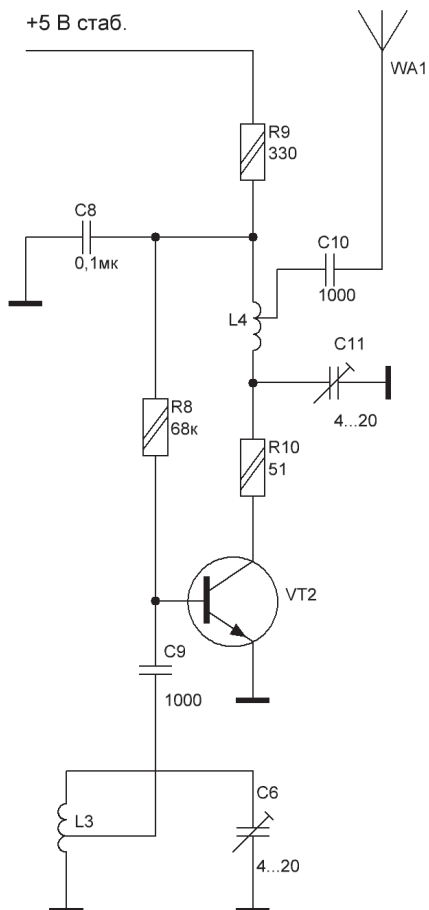
## Вариант 2



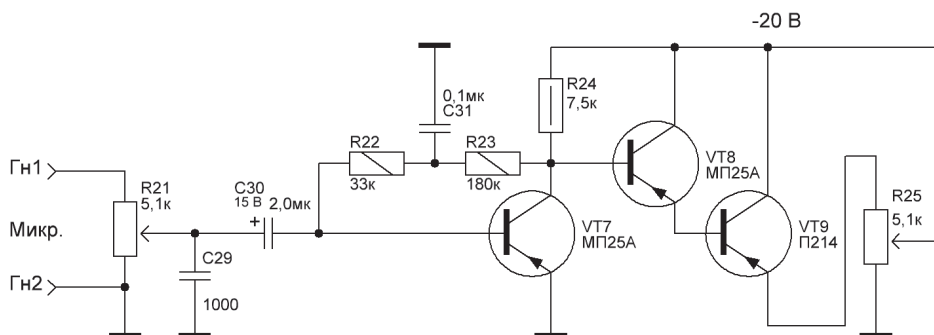
## Вариант 3



## Вариант 4

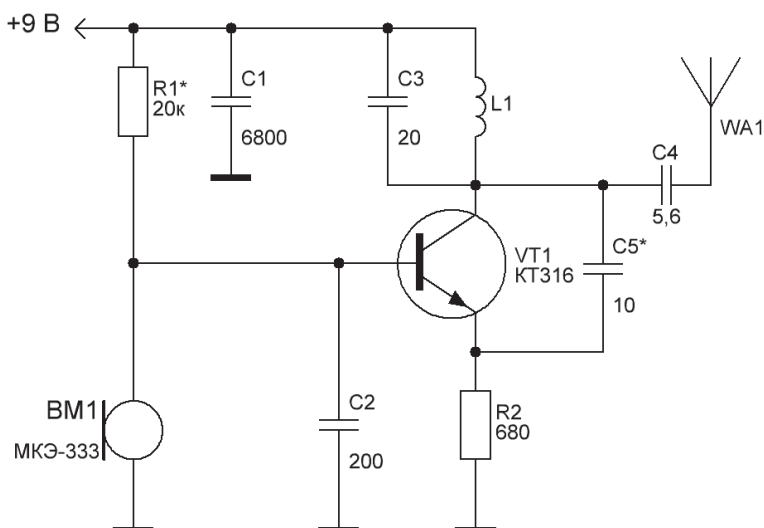


## Вариант 5

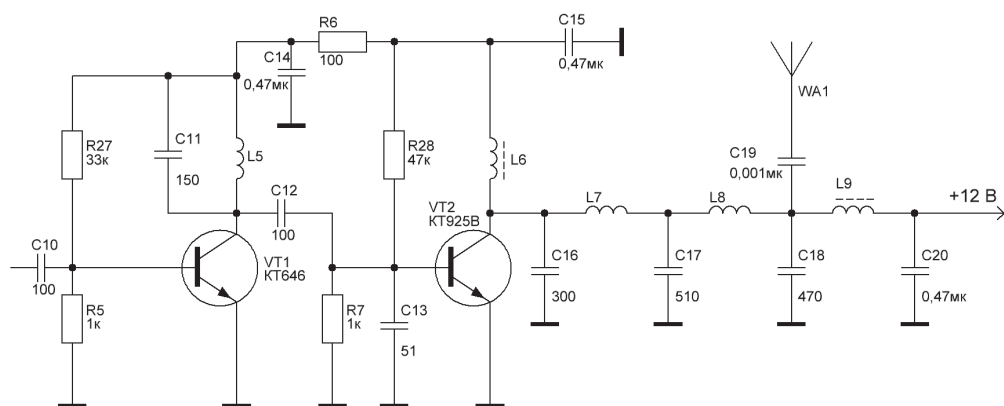




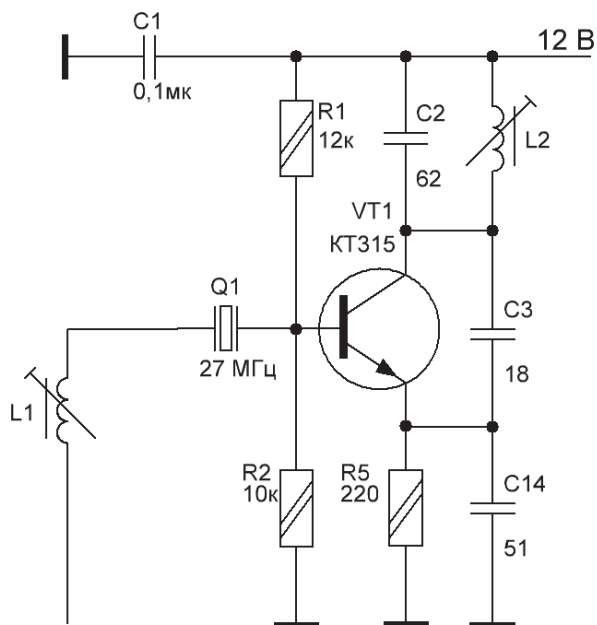
### Вариант 6



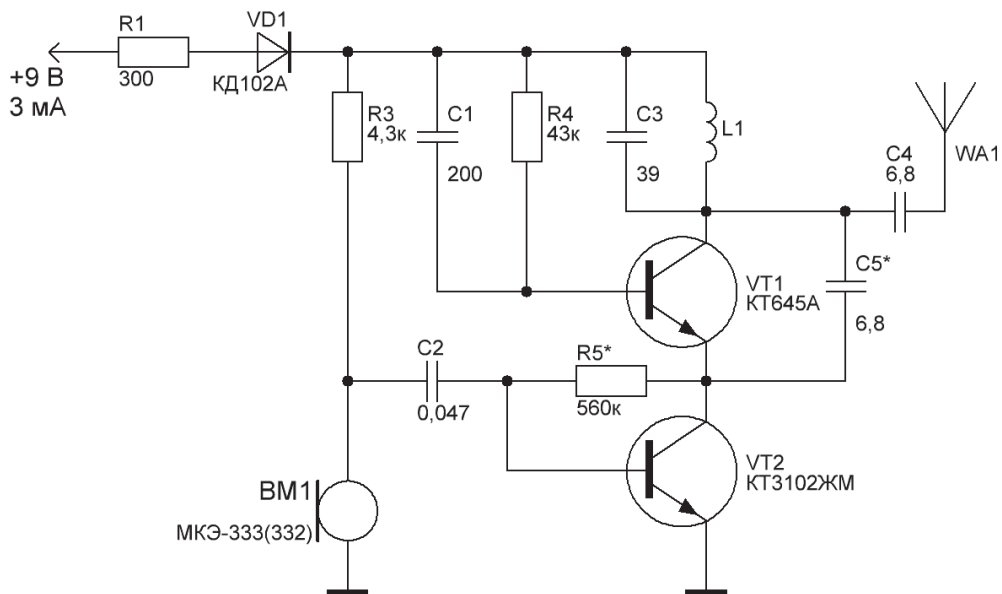
### Вариант 7



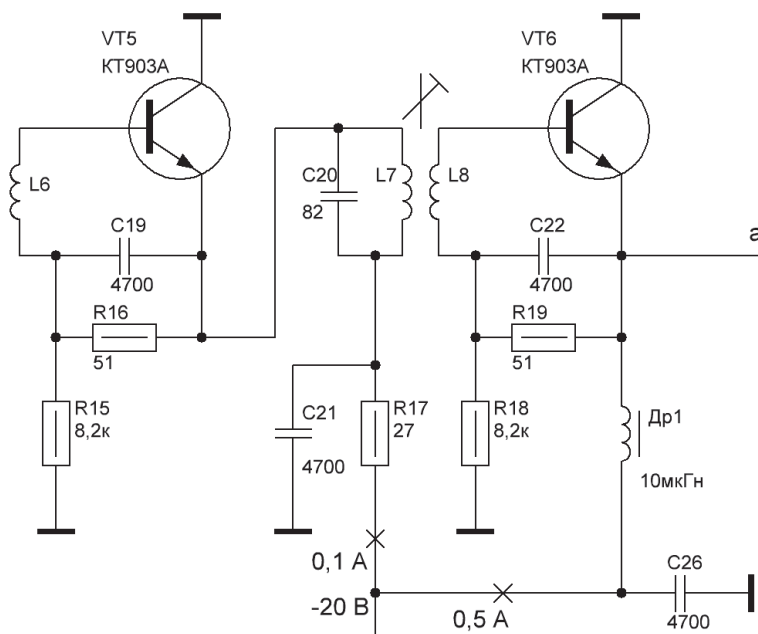
### Вариант 8



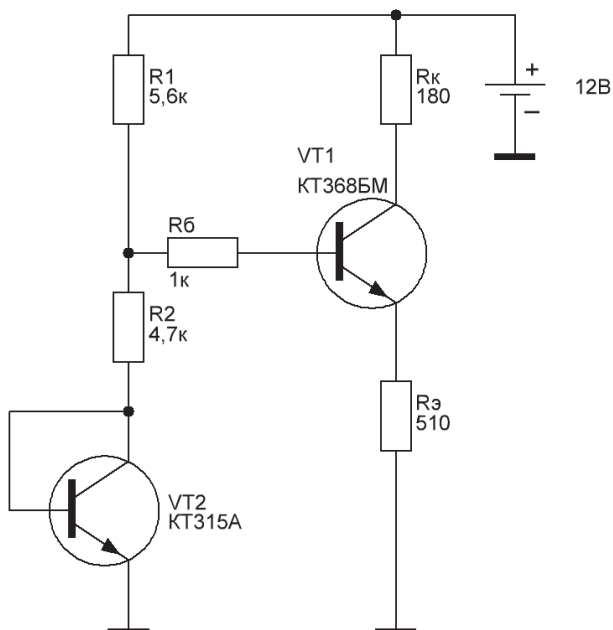
### Вариант 9



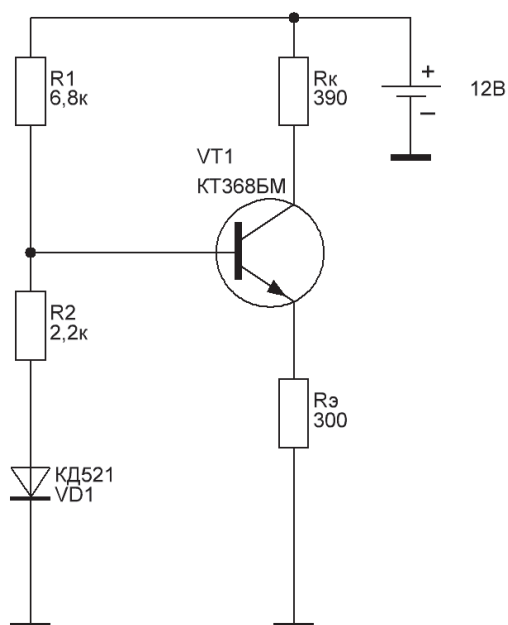
### Вариант 10



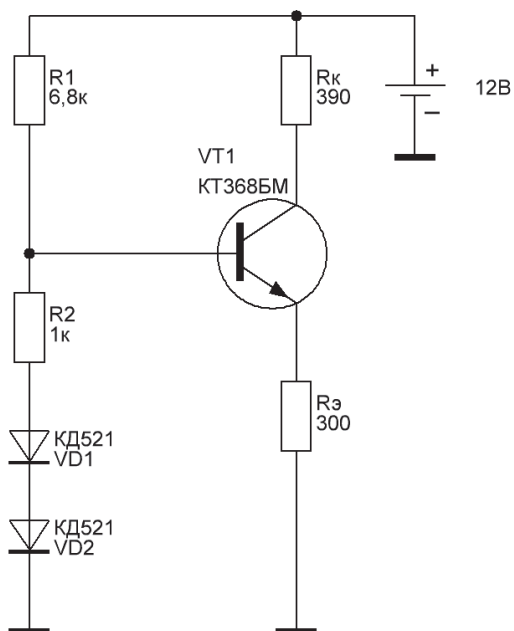
### Вариант 11



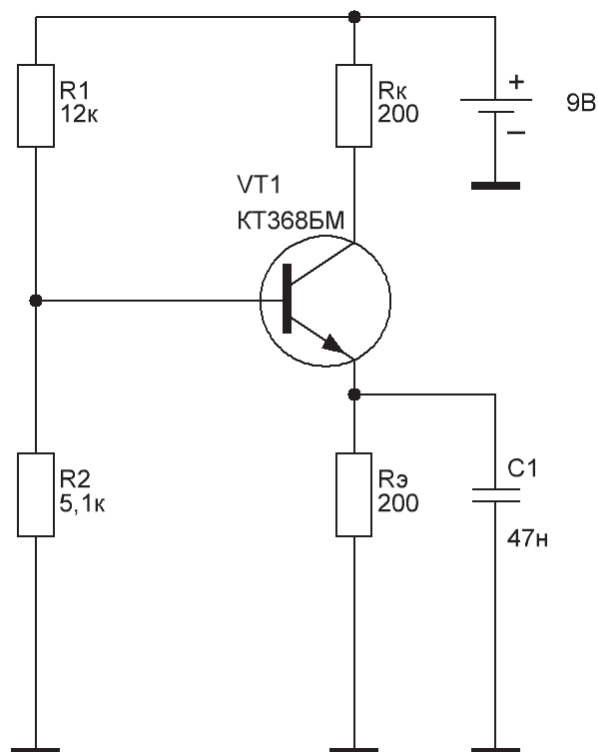
### Вариант 12



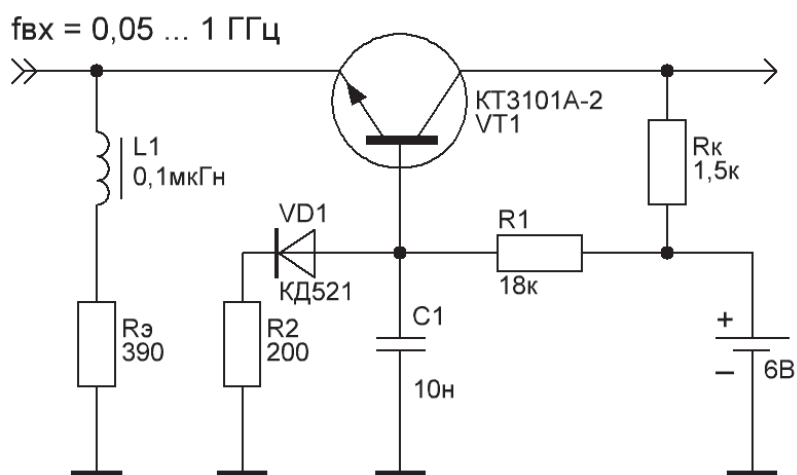
### Вариант 13



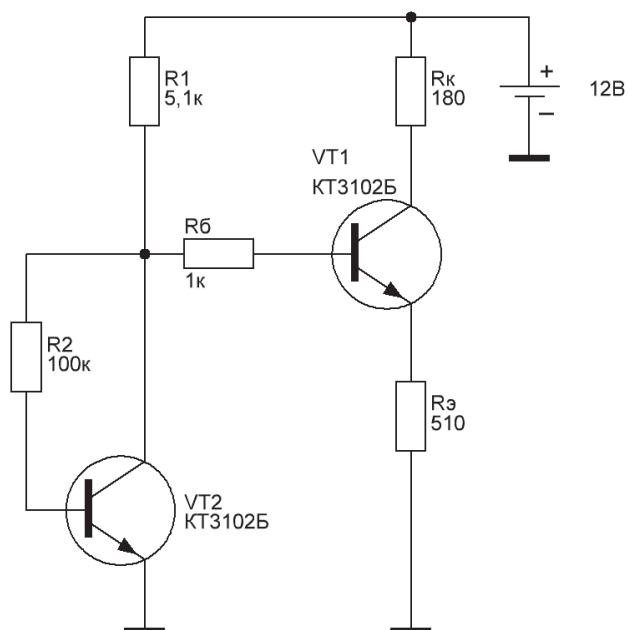
Вариант 14



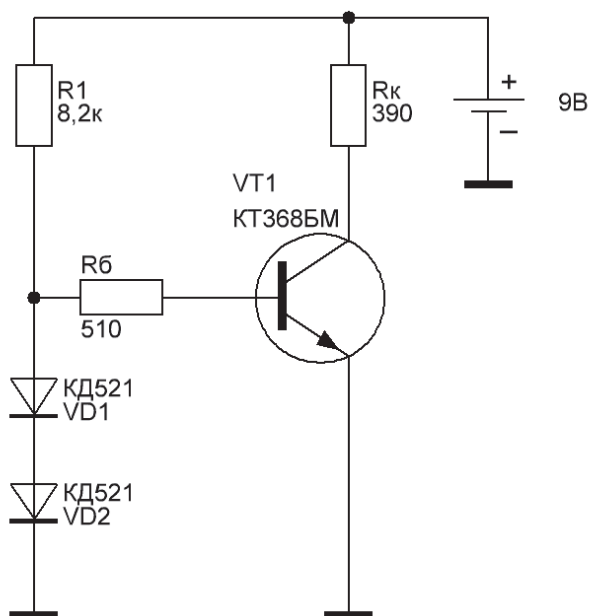
Вариант 15



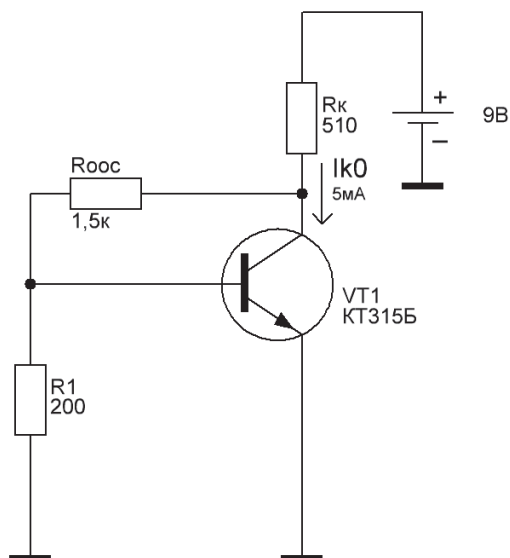
### Вариант 16



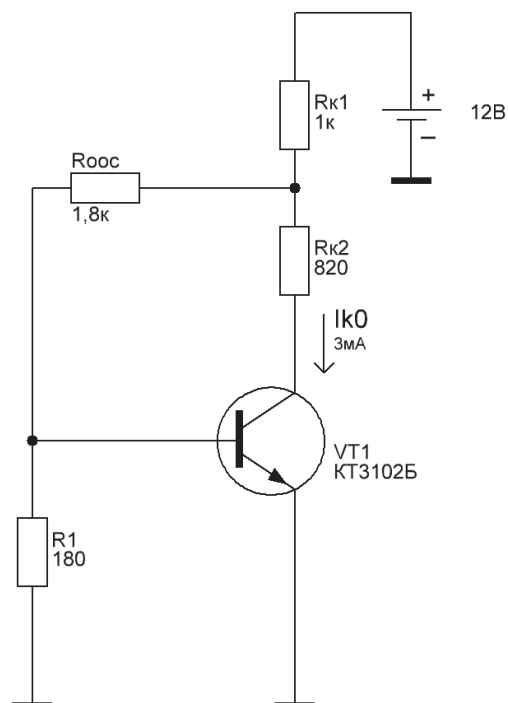
### Вариант 17



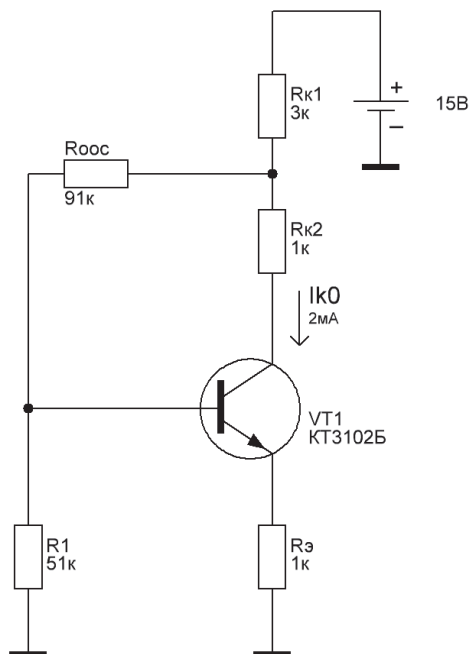
### Вариант 18



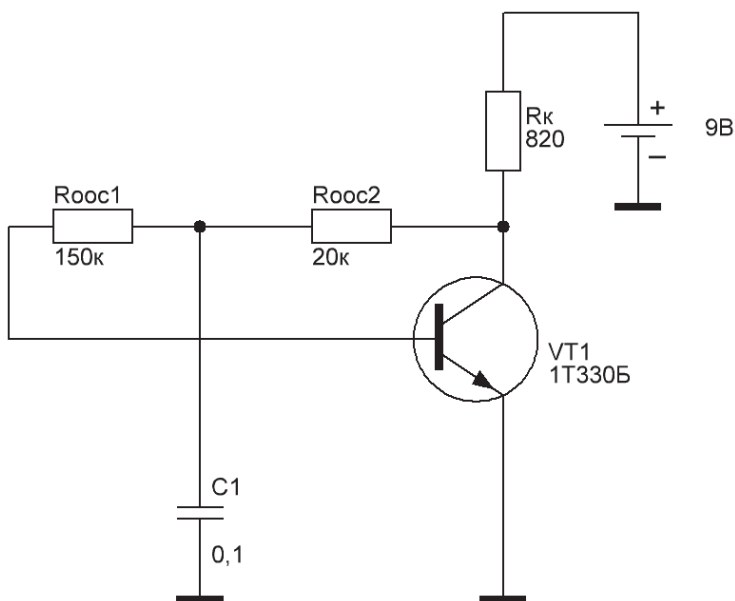
### Вариант 19



### Вариант 20

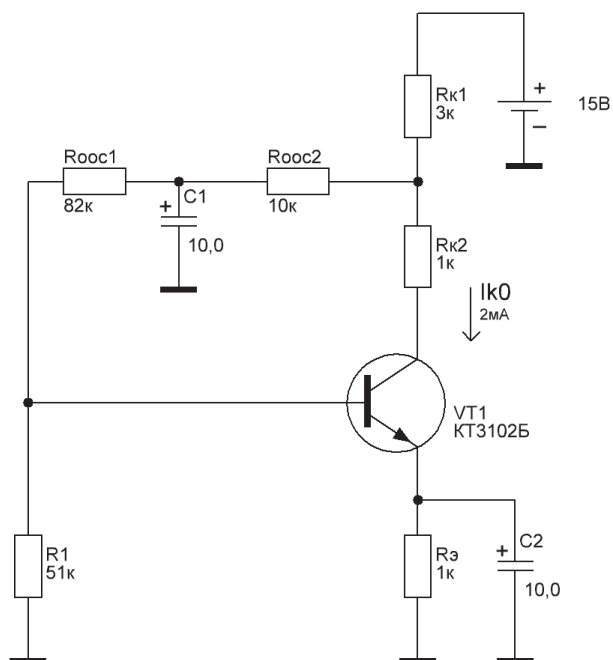


### Вариант 21

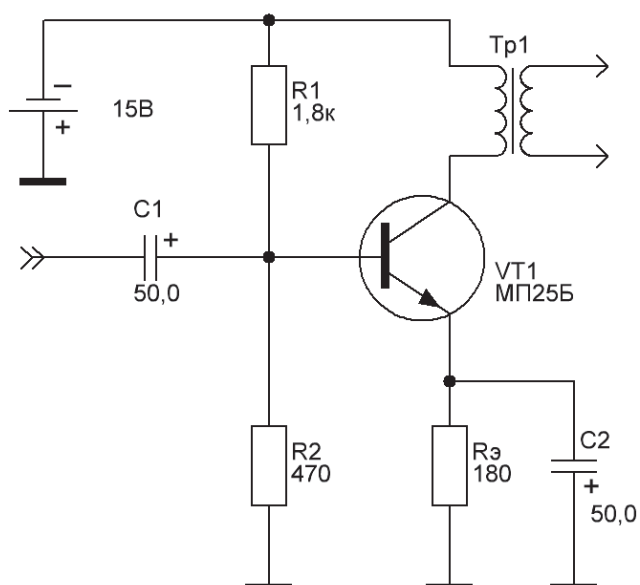




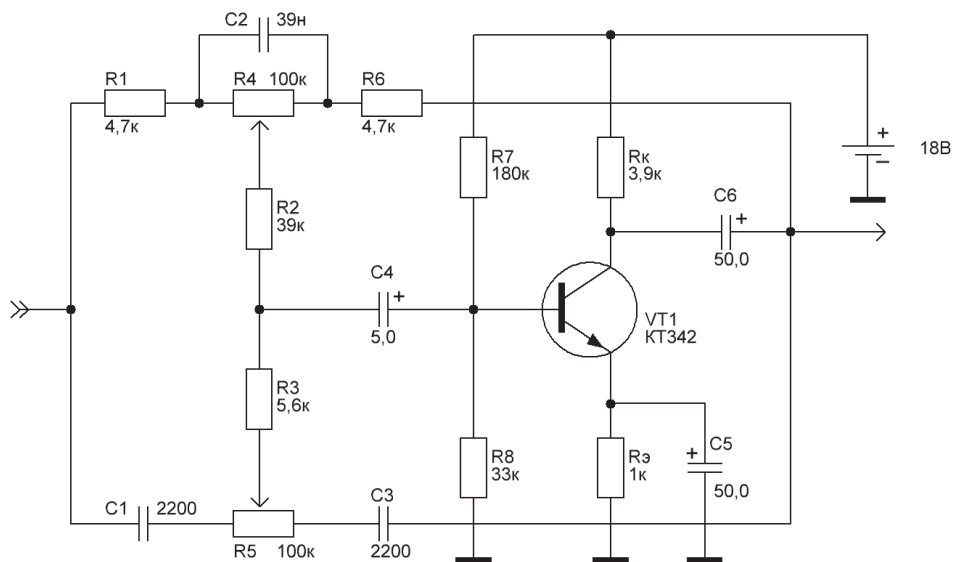
## Вариант 22



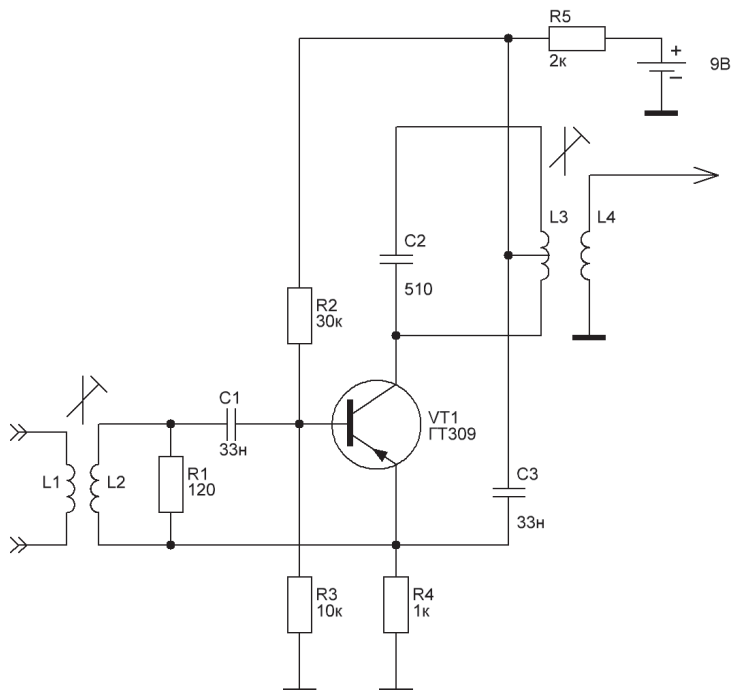
## Вариант 23



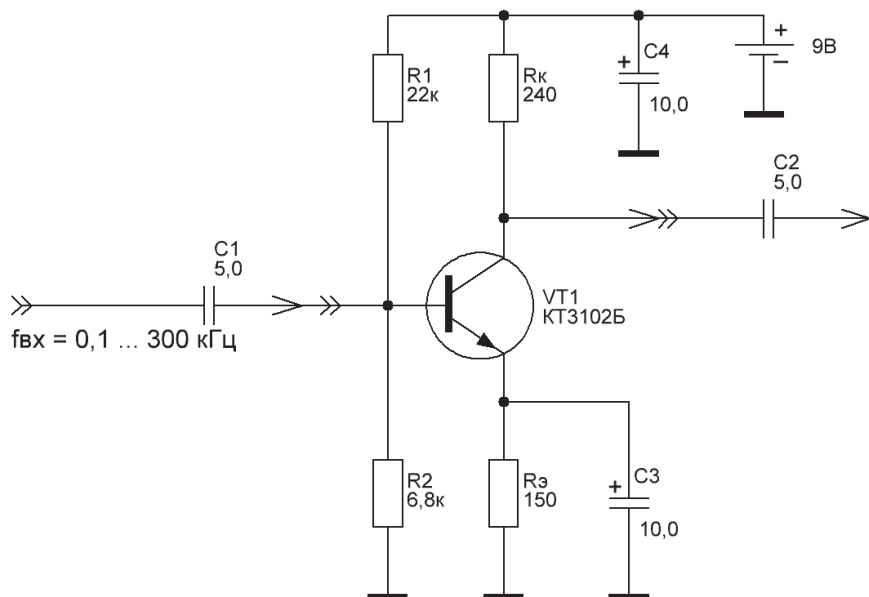
## Вариант 24



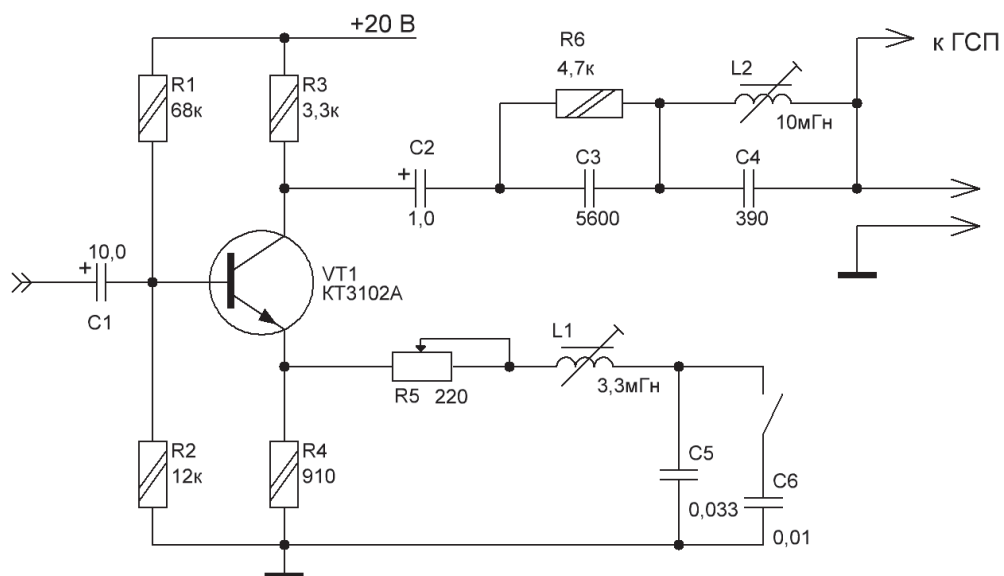
## Вариант 25



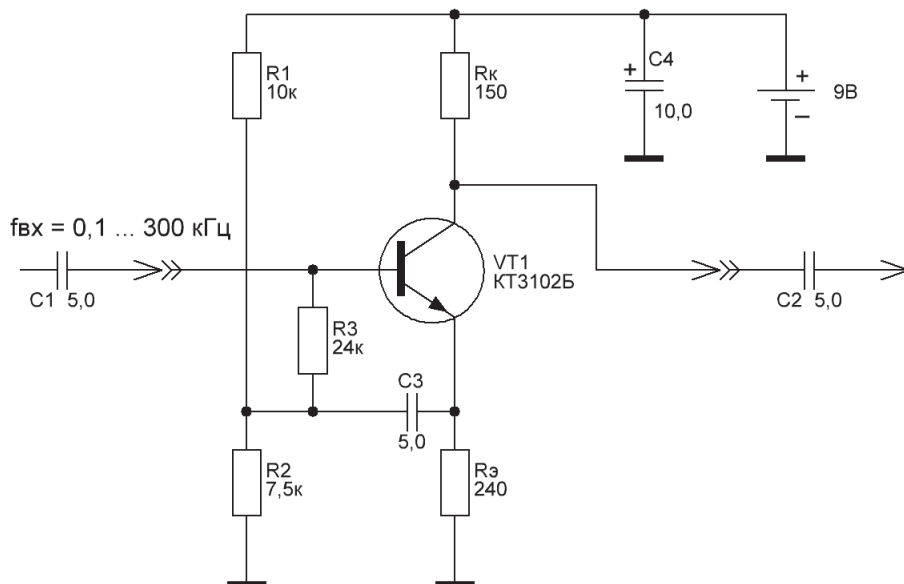
### Вариант 26



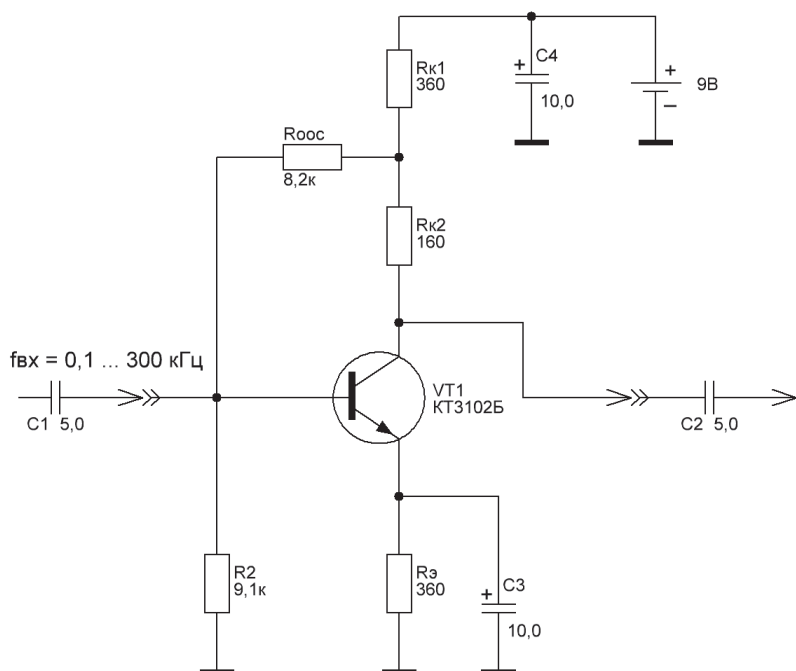
### Вариант 27



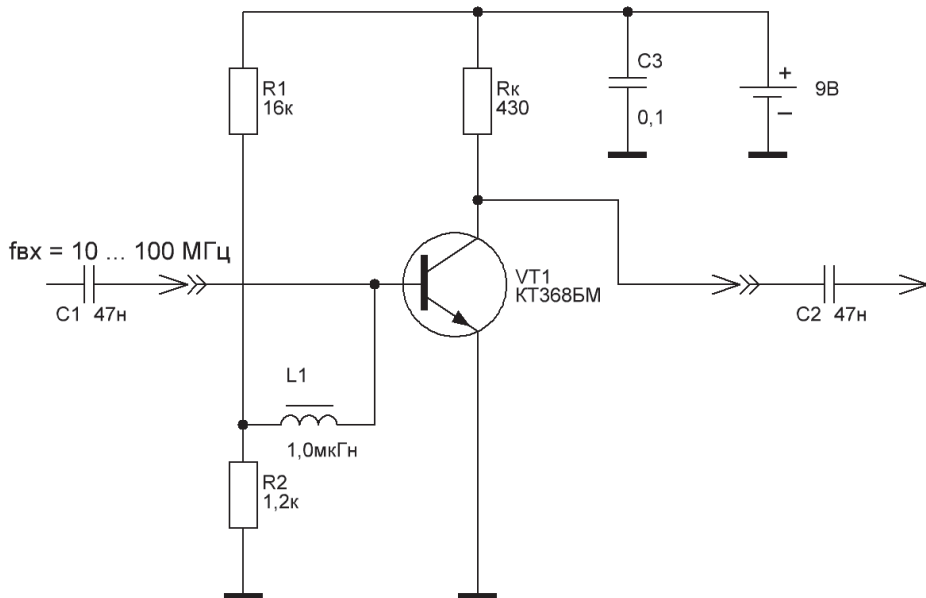
### Вариант 28



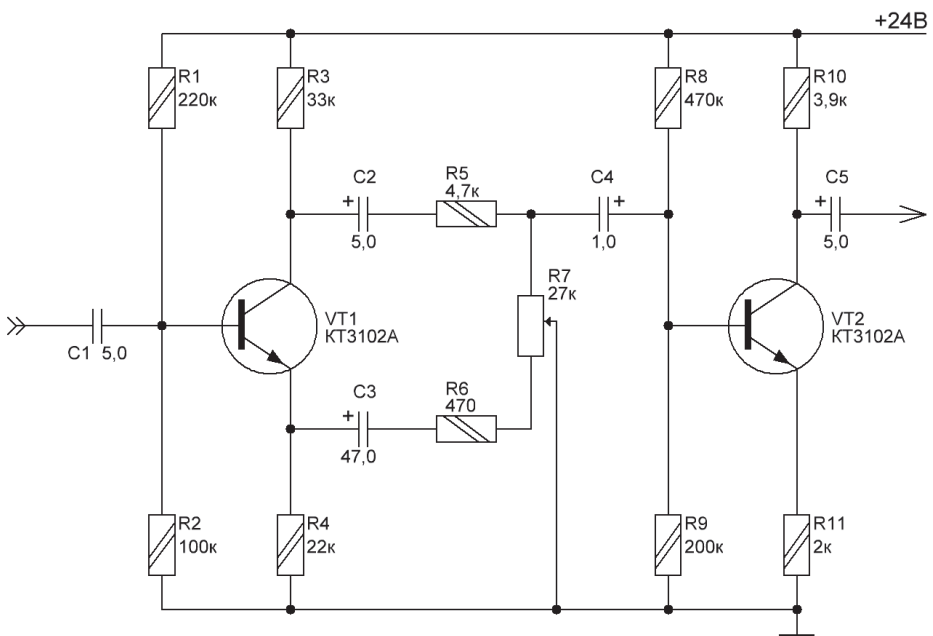
### Вариант 29



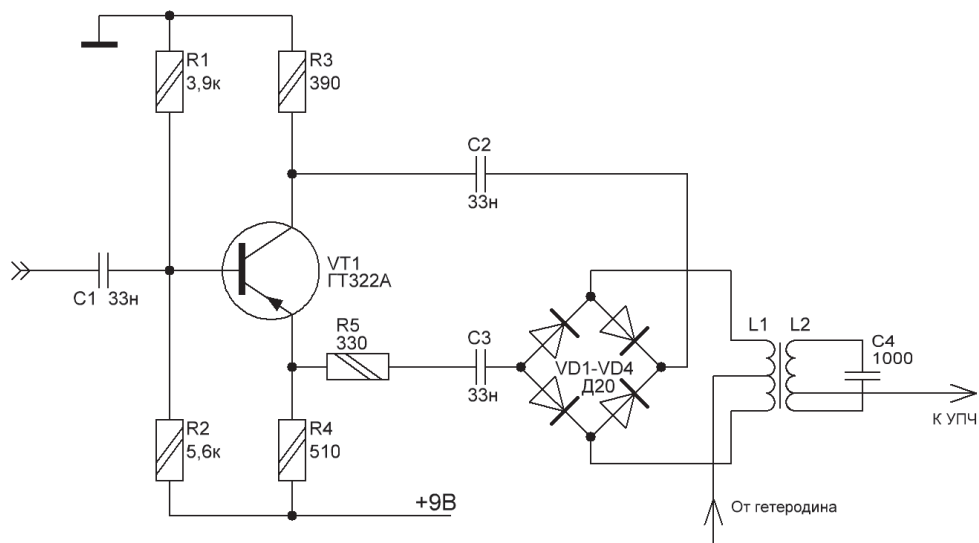
### Вариант 30



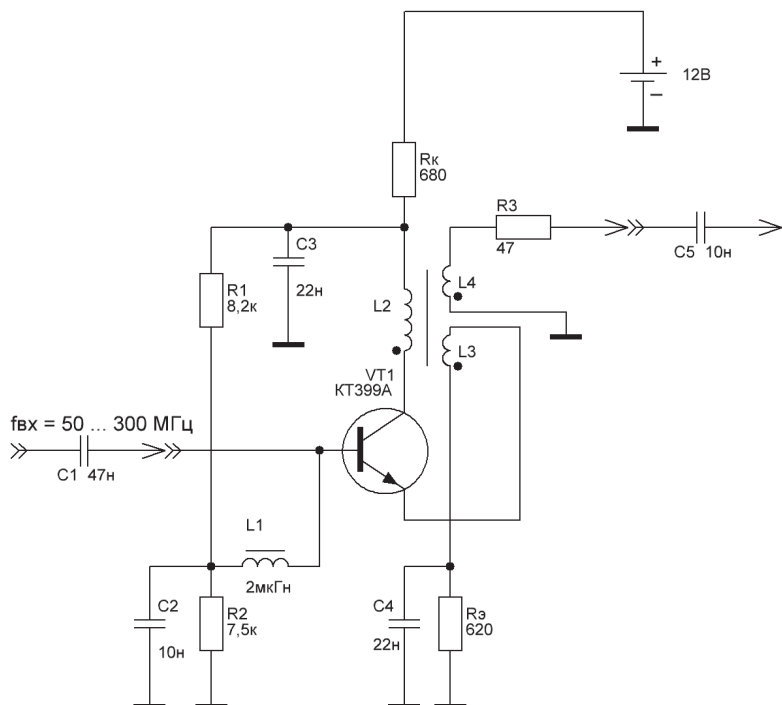
### Вариант 31



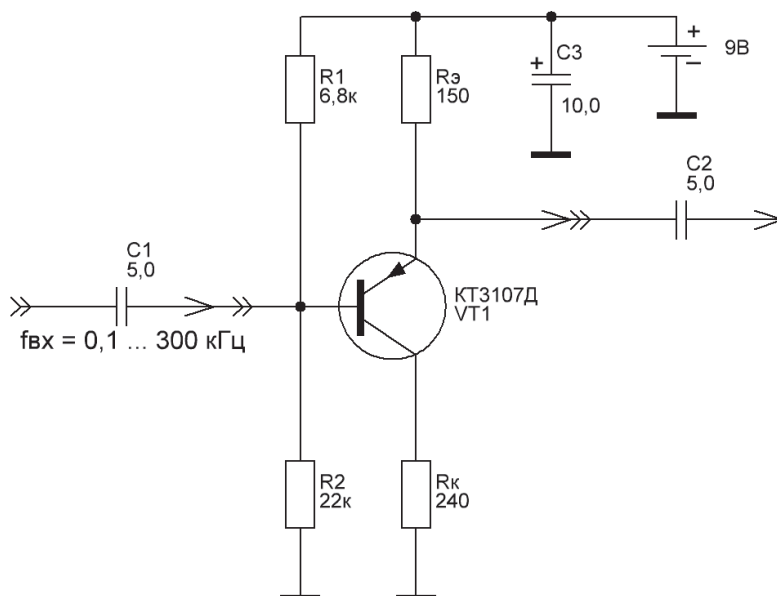
## Вариант 32



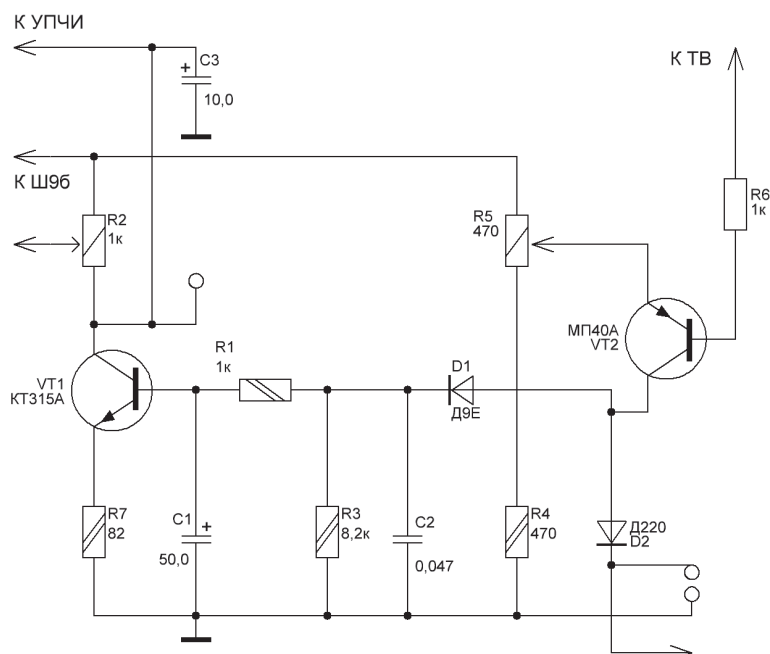
## Вариант 33



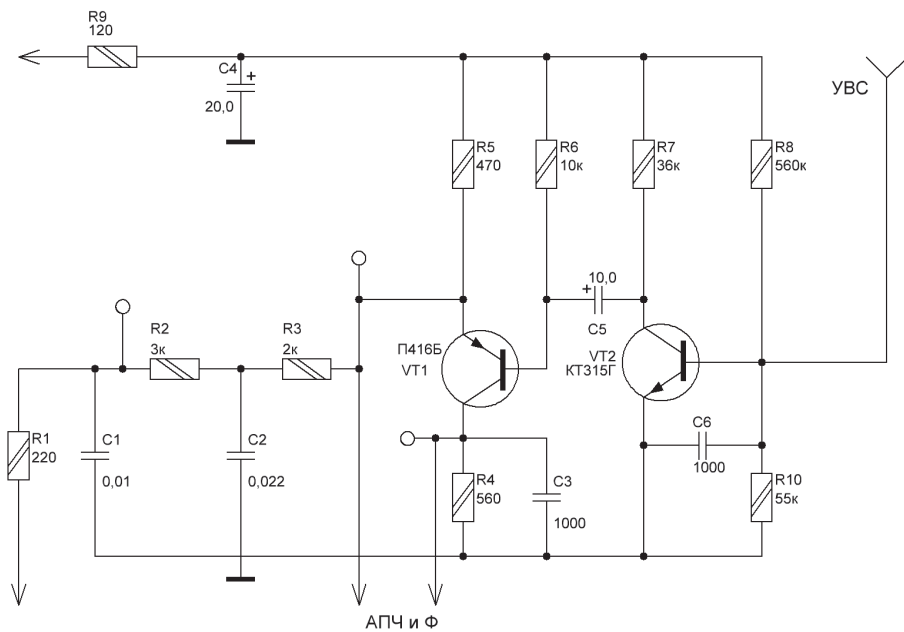
### Вариант 34



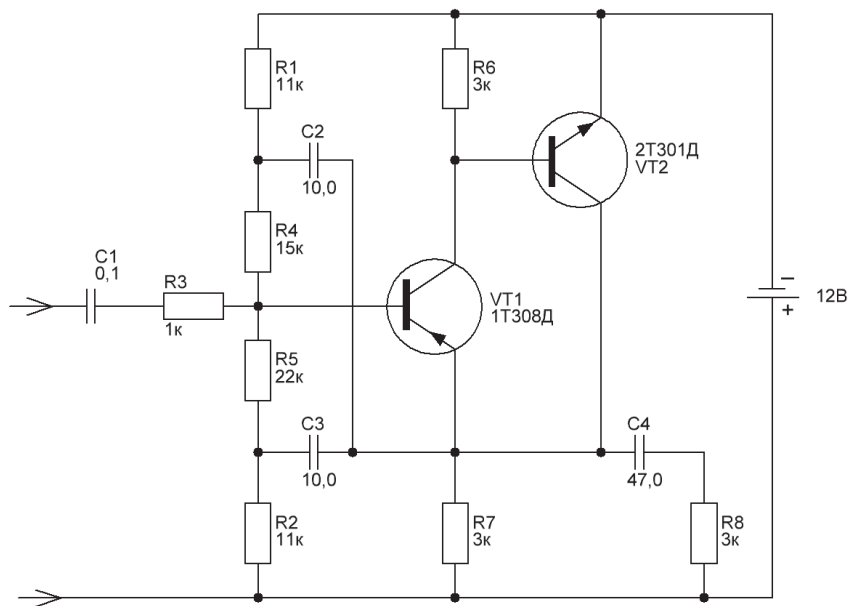
### Вариант 35



### Вариант 36

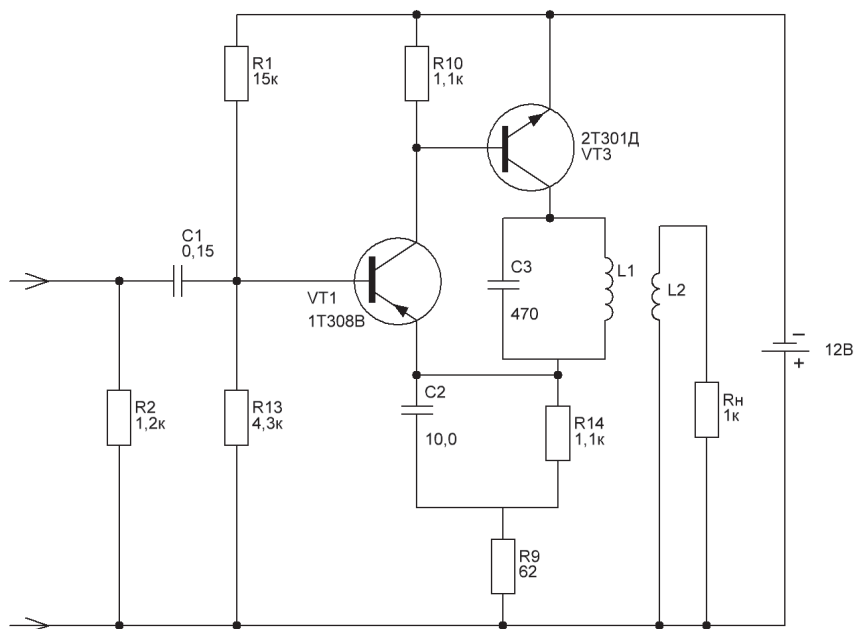


### Вариант 37

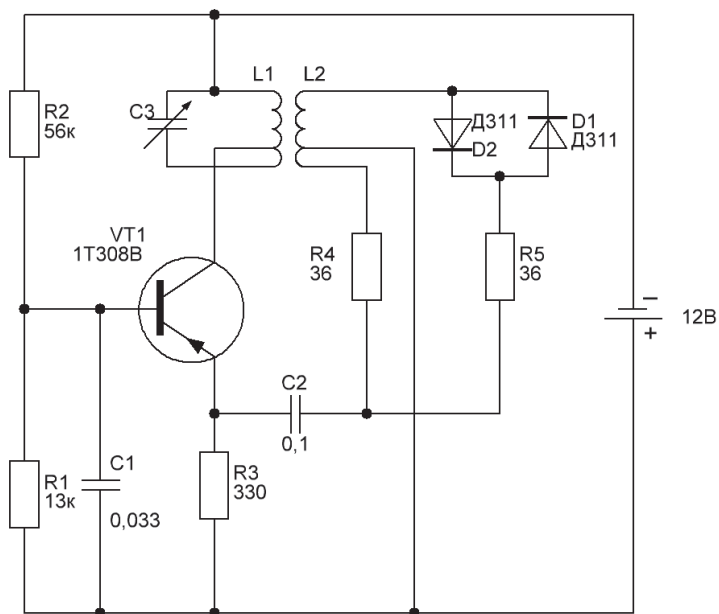




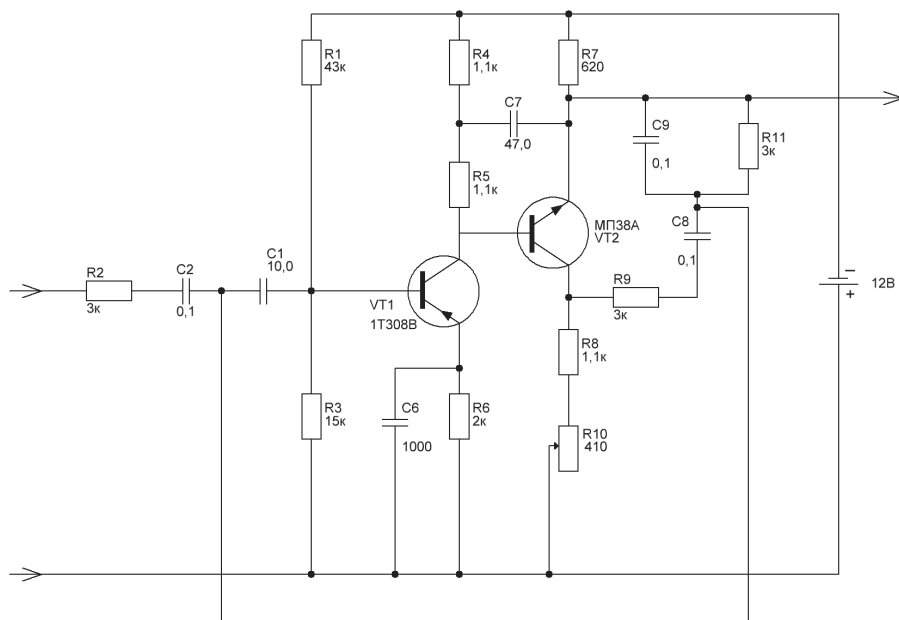
### Вариант 38



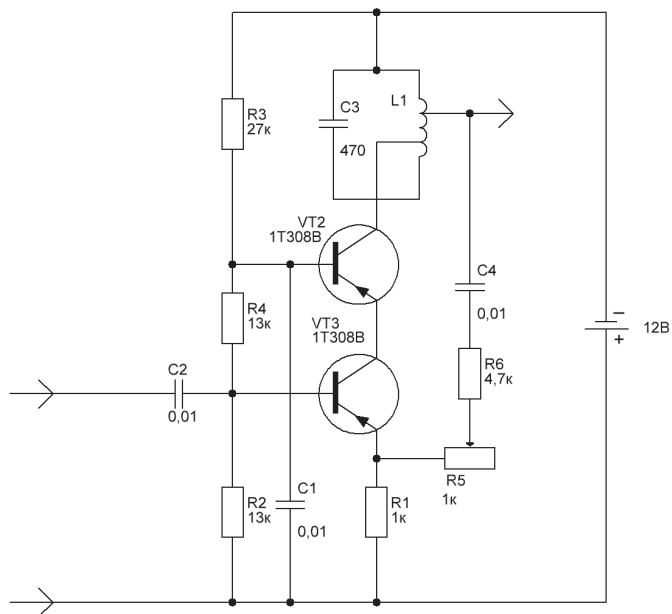
### Вариант 39



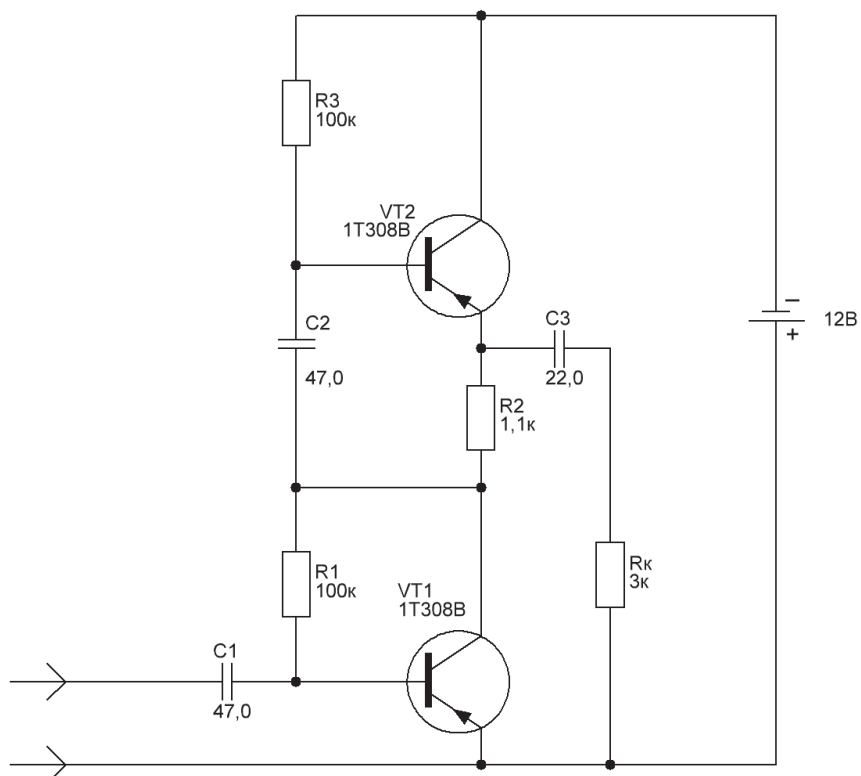
### Вариант 40



### Вариант 41



## Вариант 42



## Приложение 2

### Модели полупроводниковых диодов и биполярных транзисторов

**Полупроводниковый диод.** Нелинейная универсальная модель (схема замещения) диода показана на рис. П. 2.1 [1].

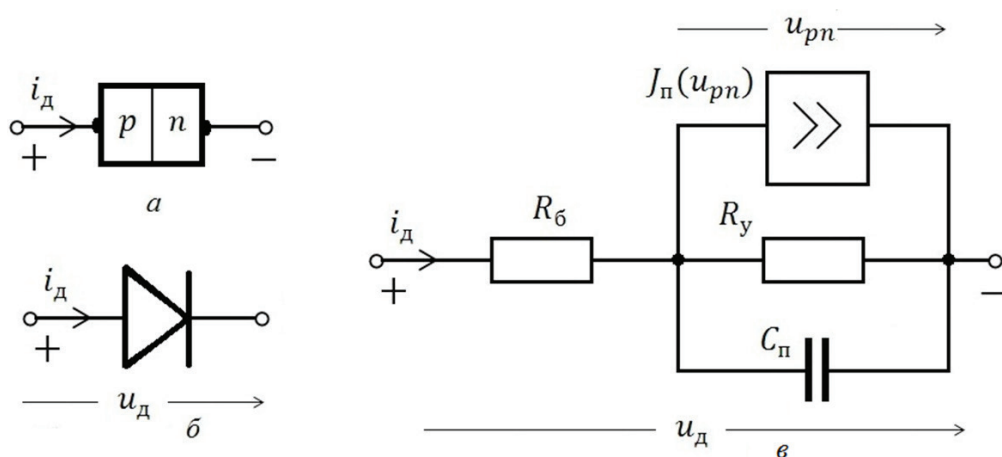


Рис. П. 2.1. Структура полупроводникового диода (а), образ на принципиальной схеме (б) и его универсальная схема замещения (в)

На этой схеме идеальные элементы означают:

$R_б$  — сопротивление выводов и материала полупроводника;

$R_y$  — сопротивление утечки диода;

$C_n$  — емкость перехода, состоящая в общем случае из диффузионной  $C_d$  и барьерной  $C_б$  емкостей;

$J_n$  — зависимый источник тока, моделирующий идеальный  $p$ - $n$ -переход по формуле

$$J_n = I_0 \left[ \exp \left( \frac{u_{pn}}{m\varphi_T} \right) - 1 \right], \quad (\text{П. 2.1})$$

где  $I_0$  — обратный тепловой ток,

$\phi_T = \frac{kT}{q}$  — тепловой потенциал, который при комнатной темпера-

туре равен  $\phi_T = 1,308 \cdot 10^{-23} \cdot 300 / 1,6 \cdot 10^{-19} = 0,0256 \text{ В}$  или 26 мВ;

$m$  — коэффициент, зависящий от материала полупроводника и конструкции диода. Обычно  $m = 1, 2 \dots 2,5$ ;

$u_{pn}$  — падение напряжения на идеальном  $p$ - $n$ -переходе.

Диффузная  $C_d$  и барьерная  $C_b$  составляющие емкости перехода  $C_n$  определяются по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_d = \left[ I_0 \exp \left( \frac{u_{pn}}{m\phi_T} \right) \right] \left( \frac{\tau_{\text{пер}}}{m\phi_T} \right), \\ C_b = \frac{C_0}{\left( 1 - \frac{u_d}{V_j} \right)^M}, \end{array} \right. \quad (\text{П. 2.2})$$

где  $\tau_{\text{пер}}$  — постоянная времени перехода, учитывающая предельную частоту работы диода и означающая время переноса через переход носителей тока;

$C_0$  — емкость диода при нулевом падении напряжения;

$M$  — коэффициент качества перехода ( $0 < M < 1$ , обычно  $M = 0,5$ );

$V_j$  — электрический потенциал, характеризующий работу выхода носителей тока, для кремниевых  $p$ - $n$ -переходов  $V_j = 0,7 - 0,75 \text{ В}$ , для германиевых —  $V_j = 0,4 - 0,6 \text{ В}$ .

**Биполярный транзистор.** Нелинейная универсальная модель (схема замещения) транзистора показана на рис. П2.2 [1].

Токи эмиттерного  $i_э$  и коллекторного  $i_к$  переходов зависят от напряжений эмиттер—база  $U_{эб}$  и коллектор—база  $U_{кб}$ . В инжекционной модели Эберса—Молла эти зависимости определяются формулами [1]:

$$\begin{aligned} i_э &= I_{э0} \left( \exp \left( \frac{U_{эб}}{m_э \phi_T} \right) - 1 \right) - \alpha_i I_{к0} \left( \exp \left( \frac{U_{кб}}{m_к \phi_T} \right) - 1 \right), \\ i_к &= I_{к0} \left( \exp \left( \frac{U_{кб}}{m_к \phi_T} \right) - 1 \right) - \alpha_n I_{э0} \left( \exp \left( \frac{U_{эб}}{m_э \phi_T} \right) - 1 \right), \\ i_б &= i_э + i_к, \end{aligned} \quad (\text{П2.3})$$

где  $I_{э0}$ ,  $I_{к0}$  — обратные тепловые токи  $p$ - $n$ -переходов, определяемые при замкнутых накоротко цепях эмиттер—база и коллектор—база,  $m_э$ ,  $m_к$  — коэффициенты, характеризующие материал и конструкцию соответствующих  $p$ - $n$ -переходов.

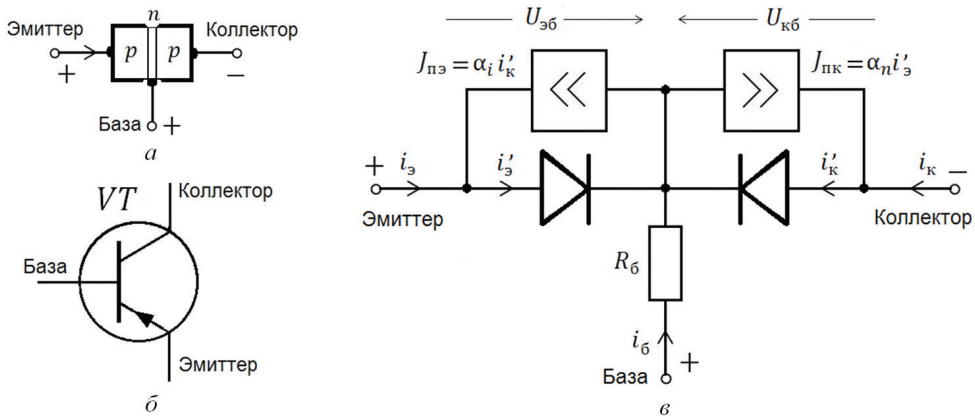


Рис. П. 2.2. Структура (а), образ на принципиальной схеме (б) и схема замещения  $pnp$ -транзистора согласно модели Эберса-Молла (в)

Для современных транзисторов значения  $\alpha_n$  лежат в диапазоне  $0,98 < \alpha_n < 1$ . Для сплавных транзисторов  $0,75 < \alpha_i < \alpha_n$ , а для транзисторов с диффузионной базой  $0,4 < \alpha_i < 0,6$ . Коэффициенты передачи по току существенно зависят от этого тока, поэтому в модели включают уравнения, аппроксимирующие эти нелинейные зависимости полиномами первой, второй или третьей степени [5]:

$$b_n = \frac{\alpha_n}{1 - \alpha_n} = b_{n0} + b_{n1} i_э + b_{n2} i_э^2 + b_{n3} i_э^3. \quad (\text{П. 2.4})$$

### Функция $F(N)$ расчета токов $p$ - $n$ -переходов диодов и транзисторов

```
function S = F(N, ParD, ParTr)
% S = F(N,ParD, ParTr)                                % Вызов функции F
% ParD = [ [Io mFi]; [Io mFi]; ... ]                  % Массив параметров диодов
% ParTr = [ [An Ioe mFie Ai Ioc mFic]; ... ]          % Массив параметров транзисторов
% Вычисление вектора нелинейностей F(N)
% по его аргументу N (в одной точке)
```

```

kD = size(ParD,1);
kTr = size(ParTr,1);
k = kD+2*kTr;
S = zeros(1,k);

for i=1:k
    if N(i)>1.6
        N(i)=1.6;
    end
end
for i=1:kD
    Nsd=ParD(i,2)*log(3e3/ParD(i,1));
    IoDs=ParD(i,1)/10.0;
    if N(i) <= 0
        S(i)= IoDs*N(i);
    elseif N(i) < Nsd
        S(i)=ParD(i,1)*(exp(N(i)/ParD(i,2))-1);
    else
        S(i)=3000.0*(1+(N(i)-Nsd)/ParD(i,2));
    end
end
for j=1:kTr
    i=kD+2*j-1;
    Ieos=ParTr(j,2)/10.0;
    Ikos=ParTr(j,5)/10.0;
    Nse=ParTr(j,3)*log(1.2e3/ParTr(j,2));
    Nsk=ParTr(j,6)*log(1.2e3/ParTr(j,5));
    if N(i) <= 0
        s1=Ieos*N(i);
    elseif N(i) < Nse
        s1= ParTr(j,2)*(exp(N(i)/ParTr(j,3))-1.0);
    else
        s1=1200.0*(1+(N(i)-Nse)/ParTr(j,3));
    end
    if N(i+1) <= 0
        s2=Ikos*N(i+1);
    elseif N(i+1) < Nsk
        s2= ParTr(j,5)*(exp(N(i+1)/ParTr(j,6))-1.0);
    else
        s2=1200.0*(1+(N(i+1)-Nsk)/ParTr(j,6));
    end
    S(i)=s1-ParTr(j,4)*s2;
    S(i+1)=s2-ParTr(j,1)*s1;
end

```

**Функция расчета матрицы Якоби**  $A = \left[ \frac{\partial F(N)}{\partial N} \right]$

```
function A = Ja(N, ParD, ParTr)
% A = Ja(N, ParD, ParTr)
% ParD = [ [Io mFi]; [Io mFi]; ...]
% ParTr = [ [An Ioe mFie Ai Ioc mFic]; ...]
% Функция вычисления матрицы Якоби
% по её аргументу N (в одной точке)

kD = size(ParD,1);
kTr = size(ParTr,1);
k = kD+2*kTr;
A = zeros(k);
for i = 1:kD % Элементы A от диодов
    Nsd=ParD(i,2)*log(3e3/ParD(i,1));
    IoDs=ParD(i,1)/10.0;
    if N(i) <= 0
        A(i,i)=IoDs;
    elseif N(i) < Nsd
        A(i,i)=ParD(i,1)*exp(N(i)/ParD(i,2));
    else
        A(i,i)=3000.0/ParD(i,2);
    end
end
for j = 1:kTr % Элементы A от транзисторов
    i=kD+2*j-1;
    i1=i+1;
    Ieos=ParTr(j,2)/10.0;
    Ikos=ParTr(j,5)/10.0;
    Nse =ParTr(j,3)*log(1.2e3/ParTr(j,2));
    Nsk =ParTr(j,6)*log(1.2e3/ParTr(j,5));
    if N(i) <= 0
        b1=Ieos;
    elseif N(i) < Nse
        b1= ParTr(j,2)*exp(N(i)/ParTr(j,3))/ParTr(j,3);
    else
        b1=1200.0/ParTr(j,3);
    end
    if N(i1) <= 0
        b2=Ikos;
    elseif N(i1) < Nsk
        b2= ParTr(j,5)*exp(N(n1)/ParTr(j,6))/ParTr(j,6);
```



```

else
    b2=1200.0/ParTr(j,6);
end
A(i,i)=          b1;
A(i,i1)= - ParTr(j,4)*b2;
A(i1,i)= - ParTr(j,1)*b1;
A(i1,i1)=        b2;
end

```

### PSpice-модель комплементарной пары транзисторов KT361 A и KT315 A

```

.MODEL KT361A PNP(Is=23.7f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=60 Bf=90 Ne=1.21
+Ise=23.7f Ikf=.122 Xtb=1.5 Br=4.39 Nc=1.8 Isc=900p Ikr=20m Rc=5
+Cjc=7p Mjc=.333Vjc=.7 Fc=.5 Cje=10p Mje=.333 Vje=.7
+Tt=131n Tf=0.1n If=40m Vtf=80 Xtf=1.1 Rb=10)
.MODEL KT315A AKO:KT361A NPN(Bf=108 DEV=20% Re=0.1 TRe1=1.5 Rb=3
+TRb1=1.2 TRc1=1.1 Rbm=2 TRm1=1.3)

```

# Оглавление

---

<b>Введение.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Получение задания и подготовка электронной схемы для анализа.....</b>	<b>7</b>
1.1. Виды заданий для самостоятельной работы .....	7
1.2. Преобразование и описание электронной схемы .....	9
1.2.1. Расстановка номеров узлов на принципиальной схеме .....	10
1.2.2. Установка на схеме дополнительных элементов .....	10
1.2.3. Замена активных компонентов схемами замещения.....	12
1.2.4. Составление эквивалентных схем для трех режимов работы схемы .....	12
1.2.5. Формирование списочной модели схемы .....	15
1.2.6. Формирование состава векторов и матриц математической модели .....	18
1.2.7. Составление топологической и параметрической информации .....	22
1.3. Информация об исходной электронной схеме.....	23
Контрольные вопросы и задания .....	24
<b>2. Компьютерная разработка эквивалентных схем     и их матрично-топологическое описание .....</b>	<b>25</b>
2.1. Интерфейс программы СХЕМА .....	25
2.2. Указания к оформлению отчета .....	32
Контрольные вопросы и задания .....	33
<b>3. Формирование математических моделей электронных схем     в различных режимах .....</b>	<b>34</b>
3.1. Интерфейс программы СИСТЕМА .....	34
3.2. Указания к оформлению отчета .....	42
Контрольные вопросы и задания .....	42
<b>4. Анализ электронных схем в статическом режиме.....</b>	<b>44</b>
4.1. Интерфейс программы СТАТИКА .....	45
4.2. Указания к оформлению отчета .....	51
Контрольные вопросы и задания .....	52

<b>5. Анализ электронных схем в динамическом режиме .....</b>	<b>53</b>
5.1. Интерфейс программы ДИНАМИКА.....	54
5.2. Указания к оформлению отчета .....	61
Контрольные вопросы и задания.....	61
<b>6. Анализ дискретных моделей электронных схем .....</b>	<b>63</b>
6.1. Интерфейс программы ДИСКРЕТ .....	65
6.2. Выполнение индивидуального задания .....	70
6.3. Оформление отчета по индивидуальному заданию .....	77
Контрольные вопросы и задания.....	78
<b>7. Анализ электронных схем в линеаризованном режиме .....</b>	<b>79</b>
7.1. Интерфейс программы ФУНКЦИЯ.....	81
7.2. Выполнение индивидуального задания .....	86
7.3. Оформление отчета по индивидуальному заданию .....	97
Контрольные вопросы и задания.....	98
<b>8. Анализ чувствительности электронной схемы в статическом режиме .....</b>	<b>100</b>
8.1. Прямой метод решения задачи чувствительности.....	101
8.2. Выполнение индивидуального задания .....	102
8.3. Оформление отчета о выполнении индивидуального задания .....	108
Контрольные вопросы и задания.....	109
<b>9. Анализ чувствительности схемных функций линейных схем.....</b>	<b>111</b>
9.1. Интерфейс программы БИФУНКЦИЯ .....	113
9.2. Выполнение индивидуального задания .....	118
9.3. Оформление отчета о выполнении индивидуального задания .....	124
Контрольные вопросы и задания.....	125
<b>10. Статистический анализ электронных схем .....</b>	<b>127</b>
10.1. Интерфейс программы СТАТИСТИКА .....	128
10.2. Выполнение индивидуального задания .....	133
10.3. Оформление отчета о выполнении индивидуального задания ....	140
Контрольные вопросы и задания.....	141
<b>Библиографический список.....</b>	<b>143</b>
<b>Приложение 1. Варианты принципиальных электрических схем для выполнения самостоятельной работы .....</b>	<b>144</b>
<b>Приложение 2. Модели полупроводниковых диодов и биполярных транзисторов .....</b>	<b>166</b>





*Учебное издание*

Трухин Михаил Павлович

**ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ  
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВ**

Редактор Н. П. Кубыщенко  
Верстка О. П. Игнатъевой

Подписано в печать 19.03.2018. Формат 70×100/16.  
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 14,2.  
Уч.-изд. л. 9,0. Тираж 50 экз. Заказ 52

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13  
Факс: +7 (343) 358-93-06  
<http://print.urfu.ru>



